



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Arūnas Norvaišas

**GELŽBETONINIŲ SIJŲ, ARMUOTŲ PLIENINĖMIS FIBROMIS, ĮSTRIŽOJO
PJŪVIO STIPRUMO SKAIČIAVIMO MODELIŲ ANALIZĖ**

**ANALYSIS OF SHEAR STRENGTH DESIGN MODELS OF STEEL FIBER
REINFORCED CONCRETE BEAMS**

Baigiamasis magistro darbas

Programa: Statinių konstrukcijos, valstybinis kodas 621H21001

Specializacija: Pastatų konstrukcijos

Statybos inžinerija 02T

Vadovas doc. dr. R. Šalna

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Juozas Valivonis
(Vardas, pavardė)

(Data)

Arūnas Norvaišas

**GELŽBETONINIŲ SIJŲ, ARMUOTŲ PLIENINĖMIS FIBROMIS, ĮSTRIŽOJO
PJŪVIO STIPRUMO SKAIČIAVIMO MODELIŲ ANALIZĖ**

**ANALYSIS OF SHEAR STRENGTH DESIGN MODELS OF STEEL FIBER
REINFORCED CONCRETE BEAMS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Pastatų konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerija 02T

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

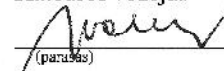
(Data)

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ IR MŪRINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Technologijos mokslų sritis
Statybos inžinerijos mokslo kryptis
Statybos inžinerijos studijų kryptis
Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001
Pastatų konstrukcijų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas


(parašas)
Juozas Valionis
(vardas, pavardė)

2012-05

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

2012-02-27 Nr. 5
Vilnius

Studentui (ei) Arūnas Norvaišas
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema Gelžbetoninių sijų, armuotų plieninėmis fibromis, įstrižo pjūvio stiprumo
skaičiavimo modelių analizė

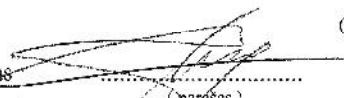
patvirtinta 2012 m. vasario 23 d. dekanų įsakymu Nr. 92ST

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2012 m. birželio 1 d.

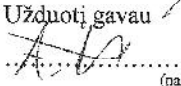
BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti plieninės fibros
armuotų sijų stiprumo skaičiavimo modelių analizę,
įvertinti sukuriamas vertinimo, traukimo įtampas, į-
tampas, atstatyti traukimo skaičiavimo modelį.
Atlikti skaičiavimo modelių tyrimą ir įvertinti, kaip
plieninės fibros gali sąlygoti sijų įtempimų-dėformaci-
jų būdą, laukiamąją gautą ir kt.
Atlikti skaičiavimo modelių tyrimą ir įvertinti, kaip
sijų.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: doc. dr. Robertas Balevičius ir prof. dr. Romualdas Vadlūga,
lekt. dr. L. Rutkienė

Vadovas 
(parašas)

doc. dr. Remigijus Šalna
(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Užduotį gavau

(parašas)
Arūnas Norvaišas
(vardas, pavardė)
2012 09 29
(data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų, sesijų ir
baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2011-2012 m. m.

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Arūnas Norvaišas, 20064348

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.) Statybos
fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, PKfm-10/1 (Studijų
programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2012 m. gegužės 17 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Gelžbetoninių sijų, armuotų plieninėmis fibromis, įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelių analizė“ patvirtintas 2012 m. vasario 23 d. dekanų potvarkiu Nr. 92st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: dr. Remigijus Šalna. Mano darbo vadovas dr. Remigijus Šalna.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Arūnas Norvaišas

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Statybos fakultetas

Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 1

Data 2012-05-18

Statybos inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas: **Gelžbetoninių sijų, armuotų plieninėmis fibromis, įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelių analizė**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos gelžbetoninės sijos, armuotos plieninėmis fibromis, jų įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo principai. Analizuojami penki skaičiavimo modeliai. Modeliams patikrinti atliekami eksperimentiniai tyrimai. Taip pat analizuojama plieninių fibrų kiekio įtaka gelžbetoninių sijų suirimo pobūdžiui. Darbą sudaro trys skyriai, išvados, literatūros sąrašas ir priedas. Įvade aptariamos plieninėmis fibromis armuoto betono savybės, formuluojami darbo tikslai. Pirmame skyriuje aprašomi fibrobetonio savybių nustatymo principai, apžvelgiami penki plieninėmis fibromis armuotų sijų įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modeliai. Antrame skyriuje atliekama šių įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelių parametrinė analizė. Trečiame skyriuje aprašomi atlikti eksperimentiniai tyrimai, pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai ir jų palyginimas su teorinėmis reikšmėmis. Suformuluotos baigiamosios išvados.

Darbo apimtis – 65 p. teksto be priedų, 41 iliustracija, 10 lentelių, 29 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedamas darbo priedas.

Prasminiai žodžiai: įstrižojo pjūvio stiprumas, fibrobetonis, gelžbetonis, pleišėjimas, plieninės fibros, standumas.

Vilnius Gediminas Technical University
Civil Engineering faculty
Reinforced concrete and masonry structures department

ISBN ISSN
Copies No. 1
Date 2012-05-18

Construction Engineering study programme magister thesis

Title: **Analysis of shear strenght design models of steel fiber reinforced concrete beams**

Author: **Arūnas Norvaišas** Academic supervisor: **Remigijus Šalna**

Thesis language

☒ Lithuanian

☐ Foreign (English)

Annotation

The master thesis deals with shear strenght design principles of steel fiber reinforced concrete beams. Five shear strenght design models were analyzed. Experimental studies were carried out for examination of the models. The influence of the volume of steel fiber for reinforced concrete beams failure character is also analyzed. The work consists of three chapters, conclusions, references and appendix. The introduction deals with steel fiber reinforced concrete properties, aim of the work. The first chapter describes the characteristics of fiber reinforced concrete determination principles, five steel fiber reinforced concrete beams shear strenght design models are described. In the second chapter parametric analysis of these models was carried out. The third chapter presents the experimental results and their comparison with theoretical values. Final conclusions are formulated.

Volume of work – 65 pages without appendix, 41 illustrations, 10 tables, 29 bibliographical sources.

Appendix included.

Keywords: shear strenght, reinforced concrete, fiber reinforced concrete, cracking, steel fiber, stiffness.

Turinys

Paveikslų sąrašas	7
Lentelių sąrašas	9
IVADAS	10
1. FIBROBETONIO SAVYBIŲ NUSTATYMO PRINCIPAI IR PLIENINĖMIS FIBROMIS ARMUOTŲ SIJŲ ĮSTRIŽOJO PJŪVIO STIPRUMO SKAIČIAVIMO MODELIŲ APŽVALGA.....	15
1.1. Fibrobetonio stiprio ir deformacinių savybių nustatymo principai	15
1.2. Reglamentuoti plieninėmis fibromis armuoto betono skaičiavimo metodai	17
1.3. Sijų, armuotų plieninėmis fibromis, įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelių apžvalga	18
1.4. Pirmojo skyriaus išvados.....	26
2. ĮSTRIŽOJO PJŪVIO STIPRUMO SKAIČIAVIMO MODELIŲ ANALIZĖ.....	27
2.1. Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelių parametrinė analizė.....	27
2.2. Antrojo skyriaus išvados	33
3. EKSPERIMENTINĖ DALIS	34
3.1. Betono, armuoto plieninėmis fibromis, gniuždymo stiprio nustatymas	35
3.2. Plieninėmis fibromis armuotų prizmių lenkimo bandymas.....	36
3.3. Gelžbetoninių sijų, armuotų plieninėmis fibromis, eksperimentinis tyrimas	39
3.3.1. Sijos C-1 deformacijos ir suirimo pobūdis.....	45
3.3.2. Sijos C-2 deformacijos ir suirimo pobūdis.....	46
3.3.3. Sijos SFRC_0,75-1 deformacijos ir suirimo pobūdis	47
3.3.4. Sijos SFRC_0,75-2 deformacijos ir suirimo pobūdis.....	48
3.3.5. Sijos SFRC_1,5-1 deformacijos ir suirimo pobūdis.....	49
3.3.6. Sijos SFRC_1,5-2 deformacijos ir suirimo pobūdis.....	51
3.4. Eksperimentinių ir teorinių lenkiamos sijos įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmių palyginimas	52
3.4.1. Sijų įstrižojo pjūvio stiprumas pagal A. K. Sharma modelį	52
3.4.2. Sijų įstrižojo pjūvio stiprumas pagal R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho modelį.....	52
3.4.3. Sijų įstrižojo pjūvio stiprumas pagal S. A. Ashouro, G. S. Hasanaino, F. F. Wafa'o modelį	54
3.4.4. Sijų įstrižojo pjūvio stiprumas pagal V. C. Li, R. Wardo, A. M. Hamza modelį.....	55
3.4.5. Sijų įstrižojo pjūvio stiprumas pagal M. Khuntia, B. Stojadinoviciaus, S. C. Goelio modelį.....	56
3.4.6. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų analizė.....	58
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	60
GALUTINĖS IŠVADOS	62
Literatūros sąrašas	64
A priedas. Lenkiamų plieninėmis fibromis armuotų sijų eksperimentiniai rezultatai	66

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Kompozitinės medžiagos, sudarytos iš fibrų ir matricos, modelis.....	10
1.2 pav. Pagrindinės fibrų savybės.....	11
1.3 pav. Tipinės plieninių fibrų formos.....	12
1.4 pav. Įvairių plieninių rūšių fibrų pavyzdžiai.....	12
1.5 pav. Gelžbetoninių sijų, armuotų plieninėmis fibromis, suirimo pobūdžio pasikeitimas iš suirimo įstizajame pjūvyje į suirimą normaliniame pjūvyje ir skersinės jėgos – įlinkio diagrama esant įvairiems fibrų kiekiams.....	14
2.1 pav. Lenkiamų plieninėmis fibromis armuotų betoninių sijų stiprį apibūdinančių indeksų nustatymo diagramos.....	18
2.2 pav. Laisvai atremtos sijos skaičiuojamoji schema.....	19
2.3 pav. Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimas pagal R. Narayanano, I. Y. S. Darwisho (Narayanan ir Darwish 1987) modelį.....	20
2.4 pav. Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimas pagal M. Khuntia, B. Stojadinoviciaus, S. C. Goelio (Khuntia <i>et al.</i> 1999) modelį.....	25
3.1 pav. Trumpose sijose atsirandantis arkos efektas.....	29
3.2 pav. Jėgos peties ir naudingojo aukščio santykio a/d įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui.....	29
3.3 pav. Fibrų kiekio įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui.....	30
3.4 pav. Išilginės armatūros įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui.....	31
3.5 pav. Betono stiprio įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui.....	32
4.1 pav. Skirtingų serijų bandinių vidutinio kubinio gniuždymo stiprio palyginimas su 95 % pasikliautinumu.....	35
4.2 pav. Lenkiamų bandinių apkrovų ir įlinkių kreivės.....	37
4.3 pav. Eksperimentinis bandinių lenkimo stiprio nustatymas.....	37
4.4 pav. Lenkiamų bandinių suirimo pobūdis.....	38
4.5 pav. Sijos skersinės jėgos ir lenkimo momento pasiskirstymo diagramos.....	39
4.6 pav. Lenkiamų sijų armavimas ir badymo ir prietaisų išdėstymo schema.....	41
4.7 pav. Sijos bandymo schema ir eiga.....	42
4.8 pav. Apkrovų ir įlinkių kreivės.....	44
4.9 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje C-1 esant skirtingoms apkrovoms.....	45
4.10 pav. T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos sijoje C-1 esant skirtingoms apkrovoms.....	45
4.11 pav. Sijos C-1 suirimo pobūdis.....	46
4.12 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje C-2 esant skirtingoms apkrovoms.....	46
4.13 pav. Sijos C-2 suirimo pobūdis.....	46

4.14 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje SFRC_0,75-1 esant skirtingoms apkrovoms.....	47
4.15 pav. T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos sijoje SFRC_0,75-1 esant skirtingoms apkrovoms.....	47
4.16 pav. Sijos SFRC_0,75-1 suirimo pobūdis.....	48
4.17 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje SFRC_0,75-2 esant skirtingoms apkrovoms.....	48
4.18 pav. T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos sijoje SFRC_0,75-2 esant skirtingoms apkrovoms.....	49
4.19 pav. Sijos SFRC_0,75-2 suirimo pobūdis.....	49
4.20 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje SFRC_1,5-1 esant skirtingoms apkrovoms.....	50
4.21 pav. T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos sijoje SFRC_1,5-1 esant skirtingoms apkrovoms.....	50
4.22 pav. Sijos SFRC_1,5-1 suirimo pobūdis.....	50
4.23 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje SFRC_1,5-2 esant skirtingoms apkrovoms.....	51
4.24 pav. T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos sijoje SFRC_1,5-2 esant skirtingoms apkrovoms.....	51
4.25 pav. Sijos SFRC_1,5-2 suirimo pobūdis.....	52
4.26 pav. Fibrų kiekio įtaka sijų įstrižojo pjūvio laikomosios galios padidėjimui įvairiose eksperimentinėse programose.....	59
4.27 pav. Lenkiamų sijų eksperimentinių ir teorinių įstrižojo pjūvio laikomosios galios reikšmių palyginimas.....	60

Lentelių sąrašas

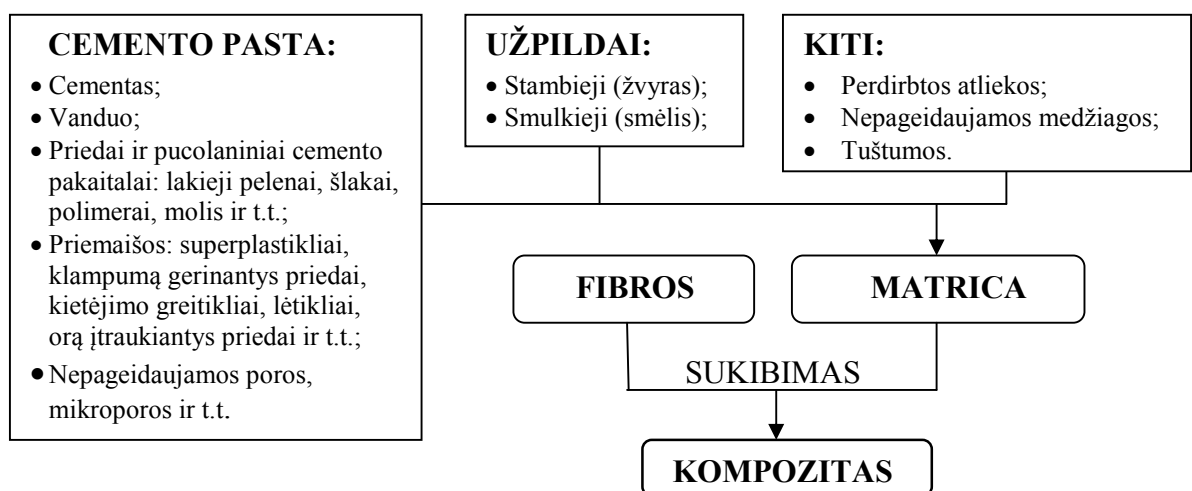
3.1 lentelė. Bandytų sijų duomenų santrauka bei eksperimentinių ir apskaičiuotų sijų įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmių palyginimas.....	27
3.2 lentelė. Jėgos peties ir naudingo aukščio santykio a/d įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui.....	29
3.3 lentelė. Fibrų kiekio V_f įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui.....	30
3.4 lentelė. Išilginės armatūros įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui.....	31
3.5 lentelė. Betono stiprio įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui.....	32
4.1 lentelė. Betono sudėtis.....	34
4.2 lentelė. Plieninėmis fibromis armuoto betono gniuždymo stiprio eksperimentinės reikšmės....	35
4.3 lentelė. Lenkiamų bandinių bandymo rezultatai.....	36
4.4 lentelė. Eksperimentinių sijų duomenys ir bandymo rezultatai.....	43
4.5 lentelė. Lenkiamų sijų eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas.....	58

IVADAS

Fibrobetonis yra kompozitinė medžiaga, sudaryta iš betono matricos ir fibrų intarpų (1.1 pav.). Laikoma, kad fibros yra chaotiškai orientuotos ir pasiskirsčiusios visame kompozito tūryje. Fibros ir matrica dirba kartu, per sukibimą.

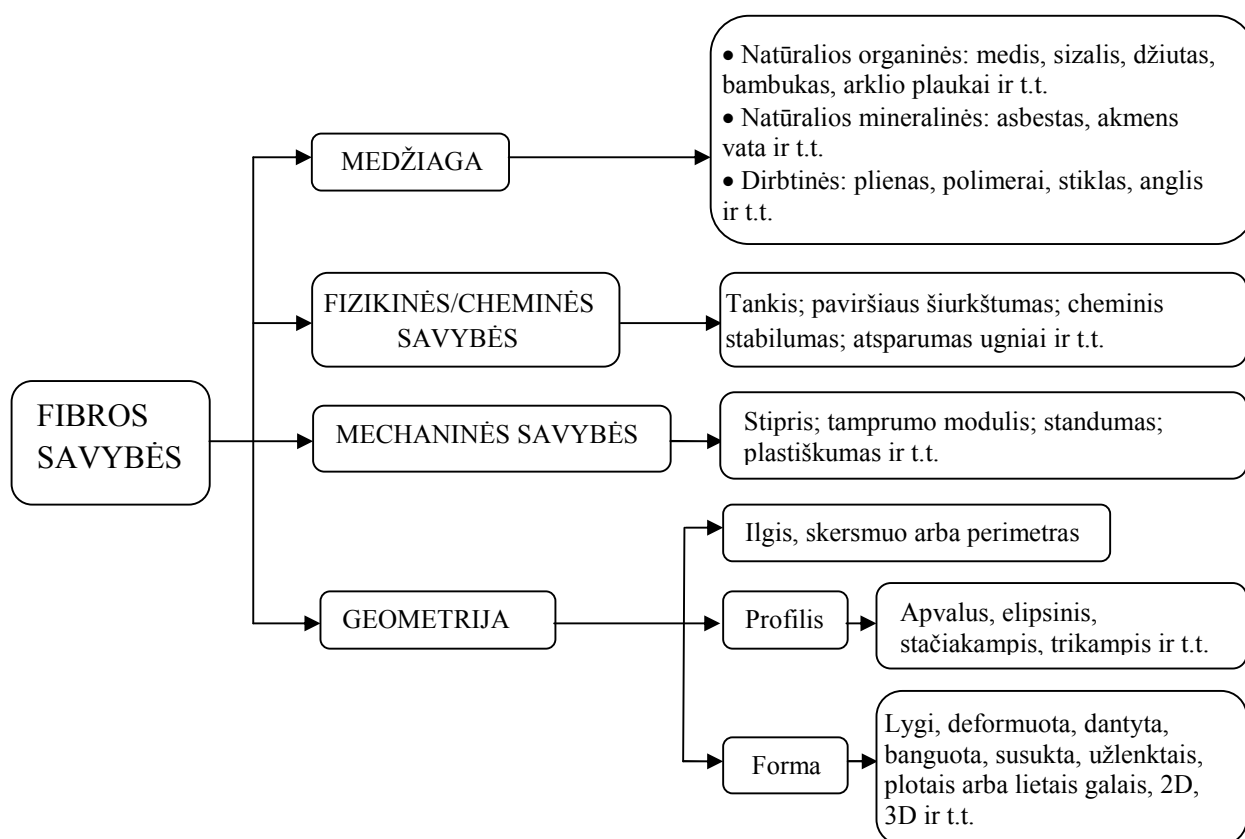
Nors idėją derinti betoną su išskirstytais fibromis, taip gaunant plastiškesnę medžiagą, dar 1874 m. užpatentavo amerikietis A. Berardas, pirmieji teoriniai tyrimai prasidėjo tik XX amžiaus 7-ajame dešimtmetyje. Pradžioje plieninėmis fibromis armuotas betonas buvo naudojamas pleišetumui mažinti, kaip pagalbinės armatūros pakaitalas plokštėse, įrengiant pramonines grindis, betoninius rezervuarus, tunelius, kelio dangas, įvairiems remonto darbams. Šiais laikais fibrobetonis vis dažniau naudojamas laikančiosiose konstrukcijose vietoje įprastinės armatūros arba kartu su ja, standžiuose mazguose (pvz., sijos ir kolonos sandūroje). Šią pažangai įtakos turėjo pagrindinių veiksnių, lemiančių tam tikrą kompozito elgseną, geresnis išmanymas, gamybos proceso tobulinimas. Fibrobetono naudojimo dažnėjimui didelę įtaką turi ir vis gerėjantis kainos ir kokybės santykis. Galima išskirti tokias pagrindines šios pažangos priežastis (Caijun ir Yilung 2008):

- Naujoviškų betono priedų (superplastiklių, klampumą didinančių priedų), gerinančių matricos savybes, pritaikymas;
- Aktyvių ar neaktyvių mikroužpildų, pvz., lakiųjų pelenų, panaudojimas ir jų poveikio matricos poringumui, stipriui ir ilgaamžiškumui geresnis išmanymas;
- Naujų fibrų rūšių panaudojimas;
- Polimerinių priedų panaudojimas ir betono impregnavimas, kuris padidina betono stiprį bei ilgaamžiškumą, pagerina fibrų sukibtį su betonu, dėl to pagerėja armavimo efektyvumas;
- Gamybos naujovės (pagerinant tolygų didelio fibrų kiekio pasiskirstymą).



1.1 pav. Kompozitinės medžiagos, sudarytos iš fibrų ir matricos, modelis (Caijun ir Yilung 2008)

Fibrobetonio gamyboje naudojamos fibros gali būti grupuojamos pagal daug savybių (1.2 pav). Pasirinkus fibros medžiagą (pvz., plieną), yra galimos labai įvairios geometrinių savybių kombinacijos. Norint, kad mechaninis sukibimas tarp fibros ir matricos būtų geresnis, fibros paviršius gali būti pakeistas jį deformuojant ar pašiurkštinant. Plieninės fibros gali būti lygios, dantytos, banguotos, susuktos, su lenktais, plotais arba lietais galais ir t.t. Dažniausia naudojamų plieninių fibrų pavyzdžiai parodyti 1.3 ir 1.4 pav. Reikia pažymėti, kad tiesios, lygiu paviršiumi fibros, kurios buvo naudojamos pradžioje, dabar naudojamos retai, nes jos neužtikrina efektyvaus sukibimo su betono matrica. Šiuo metu tokios fibros sudaro mažiau nei 10 % visų pagaminamų fibrų kiekio (Katzner 2006).

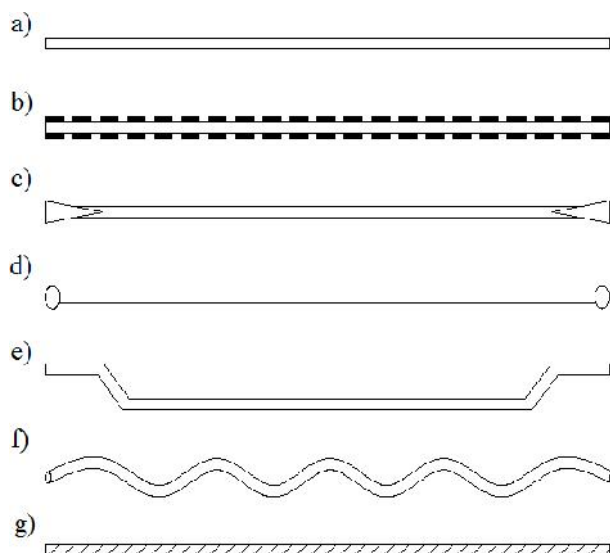


1.2 pav. Pagrindinės fibrų savybės (Caijun ir Yilung 2008)

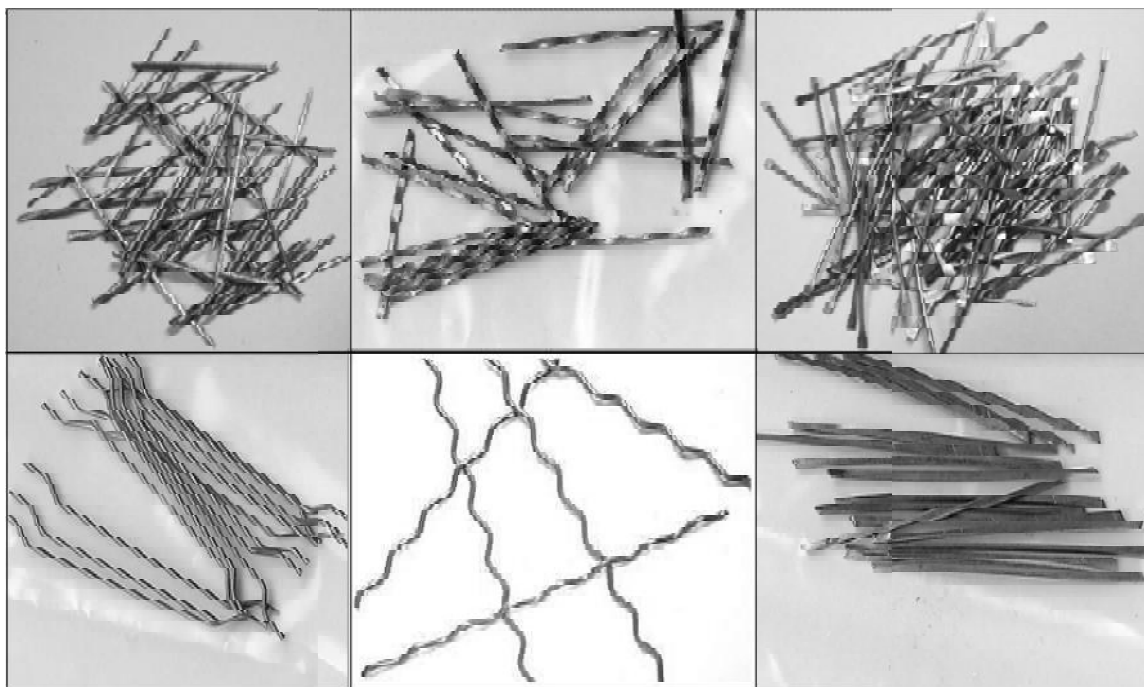
Labiausiai paplitusios yra apvalios fibros, kurių skersmuo yra nuo 0,4 iki 0,8 mm, o ilgis nuo 25 iki 60 mm (Naaman 2003). Jų ilgio ir skersmens (arba ekvivalentinio skersmens) santykis būna iki 100, dažniausia nuo 40 iki 80. Būna ir mažesnio skersmens fibrų, tačiau jos yra daug brangesnės. Fibrų gamybai dažniausia naudojamas anglinis arba legiruotas (nerūdijantis) plienas. Iš nerūdijančio plieno gaminamos korozijai atsparios fibros, kurios dažniausia naudojamos atspariose ugniai ir jūrinėse konstrukcijose.

Plieninės fibros gali būti gaminamos įvairiais būdais, priklausomai nuo norimos formos. Priklausomai nuo plieno rūšies ir gamybos technologijos, fibrų tempiamasis stipris gali būti nuo 345 iki 2100 MPa, o ribinis pailgėjimas 0,5-3,5 % (Bentur ir Mindess 1990). Apvalios fibros

gaminamos pjaustant arba kapojant 0,25-1,0 mm skersmens vielas. Plokščios fibros gali būti gaminamos karpant lakštus ar suplojant vielą. Plokščių fibrų skerspjūvis paprastai būna 0,15-0,40 mm storio, 0,25-0,90 mm pločio. Norint, kad naudojimas ir maišymas būtų lengvesnis, fibros gali būti suklijuotos vandenyje tirpstančiais klijais į pluoštus po 10-30 fibrų.



1.3 pav. Tipinės plieninių fibrų formos: a – tiesi, lygi; b – dantyta, pašiurkštintu paviršiumi; c – apvali, su lietais galais; d – apvali, su plotais galais; e – apvali su lenktais galais; f – banguota; g – susukta

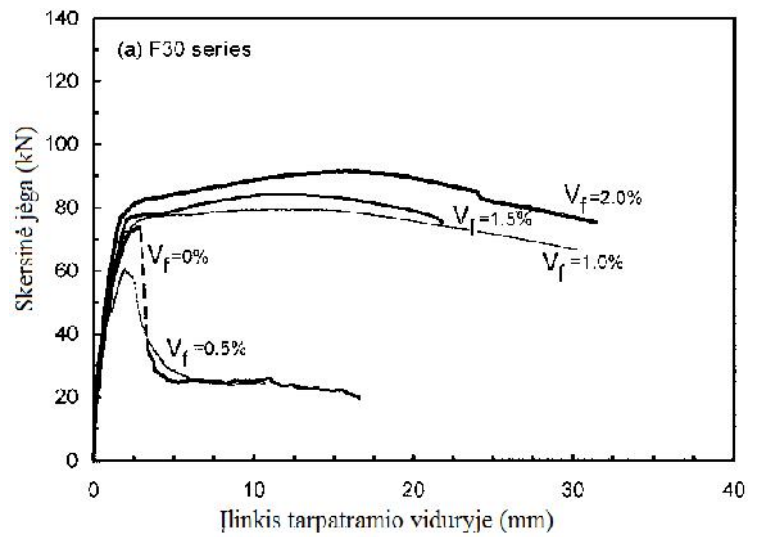
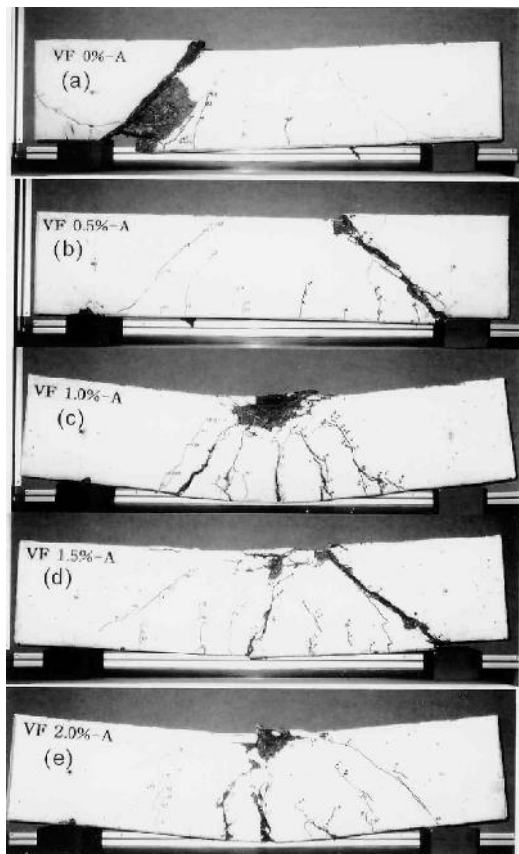


1.4 pav. Įvairių plieninių rūšių fibrų pavyzdžiai

Nustatyta, kad į betoną įmaišius plieninių fibrų galima išvengti pleišėjimo ar bent jį sumažinti, padidinti atsparumą dinaminių apkrovų poveikiui, pvz., dėl nuovargio, sprogo ar žemės drebėjimo (Cho ir Kim 2003, Haisam 2011). Kai betonas pradeda pleišėti, atsitiktinai orientuotos fibros suvaržo mikropleišėjimą ir pristabdo plyšių plitimą, todėl padidėja standumas, tempiamasis stipris ir plastiškumas (Casanova ir Rossi 1999, Li 2002, Choi *et al.* 2007, Hai *et al.* 2010). Norint kontroliuoti paprasto betono pleišėjimą, reikalingas didelis pagrindinės armatūros kiekis, ypač konstrukcijose, kur leidžiami labai maži plyšių pločiai. Tai sukelia daug nepatogumų: norint užtikrinti minimalų atstumą tarp armatūros strypų, konstrukcijos matmenys dažnai turi būti didesni nei reikalinga apkrovai atlaikyti; didesnės darbo sąnaudos; sunkumai užpildant tarpus tarp armatūros strypų betonu (Jansson 2008). Naudojant fibras vietoje įprastinės armatūros arba kartu su ja, šie trūkumai gali būti sumažinti ar netgi panaikinti. Fibros dažnai naudojamos įstrižojo pjūvio laikomajai galiai padidinti, armatūros sangrūdai kritinėse vietose sumažinti. Naudojant fibras galima sumažinti elemento matmenis ir/arba svorį, o tai sumažina pamatų kainą, sunaudojamos armatūros kiekį ir transportavimo išlaidas (Li 2002).

Projektuojant gelžbetonines sijas siekiama, kad suirimas viršijus leistinąją apkrovą įvyktų normaliniame pjūvyje (1.5. pav., e). Tokių sijų suirimą galima lengvai prognozuoti (Collins *et al.* 2008). 1.5. pav. parodyta, kaip keičiasi sijos, pagamintos iš normalaus stiprio betono, suirimo pobūdis didinant plieninių fibrų kiekį. Kai fibrų kiekis $V_f = 0\%$, sija suyra įstrižajame pjūvyje (1.5. pav. a.). Kai $V_f = 0,5\%$, pradeda intensyviau formuotis normaliniai plyšiai, tačiau suirimas vėl įvyksta įstrižajame pjūvyje (1.5. pav. b.). Kai $V_f = 1,0-1,5\%$, normaliniai plyšiai išplinta ir įvyksta mišrus suirimas dėl skersinės jėgos ir lenkimo momento poveikio (1.5. pav. c., d.). Kai $V_f = 2,0\%$, suirimas įvyksta normaliniame pjūvyje (1.5. pav. e). Taigi 2,0 % fibrų pakeičia trapų sijos suirimą įstrižajame pjūvyje į plastišką, prognozuojamą suirimą normaliniame pjūvyje. Vieni eksperimentiniai tyrimai rodo, kad stipriojo betono sijų suirimo pobūdžiui pakeisti pakanka 1,5 % plieninių fibrų (Cho ir Kim 2003), kiti rodo, kad pakanka vos 1,0 % plieninių fibrų (Šalna 2008). Be to, įvairių autorių sijų, armuotų plieninėmis fibromis, įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modeliai ir jų esminiai principai taip pat skiriasi (A. K. Sharma 1986, Narayanan ir Darwish 1987, Ashour *et al.* 1992, Li *et al.* 1992, Khuntia *et al.* 1999).

Todėl darbo tikslas yra nustatyti plieninių fibrų kiekio įtaką sijos įstrižojo pjūvio stiprumui ir suirimo pobūdžiui. Išanalizavus sijų, armuotų plieninėmis fibromis, įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelius ir remiantis eksperimentiniais rezultatais bus siekiama nustatyti, kuris modelis tiksliausiai įvertina įstrižojo pjūvio stiprumą ir realiausiai atspindi suirimo pobūdį.



1.5 pav. Gelžbetoninių sijų, armuotų plieninėmis fibromis, suirimo pobūdžio pasikeitimas iš suirimo įstižajame pjūvyje į suirimą normaliniame pjūvyje ir skersinės jėgos – įlinkio diagrama esant įvairiems fibrų kiekiams (Cho ir Kim 2003).

1. FIBROBETONIO SAVYBIŲ NUSTATYMO PRINCIPAI IR PLIENINĖMIS FIBROMIS ARMUOTŲ SIJŲ ĮSTRIŽOJO PJŪVIO STIPRUMO SKAIČIAVIMO MODELIŲ APŽVALGA

1.1. Fibrobetonio stiprio ir deformacinių savybių nustatymo principai

Didžiausia problema, su kuria susiduriama siekiant nustatyti fibrobetonio stiprio ir deformacines savybes yra įtempių ir deformacijų ($\sigma - \varepsilon$) priklausomybės nustatymas. Priėmus, kad abu fibrobetonio komponentai turi plastinių savybių, įtempių ir deformacijų kreivė turi ribas, kuriose abu komponentai deformuojasi tamptariai, o po to vienas komponentas tamptariai, kitas – plastiškai (Marčiukaitis 1998, Šalna 2008). Ribiniai kompozito įtempiai nustatomi kriterijumi:

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = 0;$$

čia F – jėga, kuri veikia medžiagą.

Pritaikius „mišinio dėsnį“, gaunama:

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = \left(\frac{dF_c}{d\varepsilon} \right) (1 - V_f) + \left(\frac{dF_f}{d\varepsilon} \right) V_f.$$

Kai įtempiai ir deformacijos yra maži, kompozitas deformuojasi tamptariai. Bendras kompozito pailgėjimas Δl bus lygus atskirų komponentų pailgėjimams ir atvirkščiai:

$$\begin{cases} F_c = F_f + F_c \\ \varepsilon = \varepsilon_f = \varepsilon_c = \varepsilon_{sfrc} \end{cases}.$$

Tada kompozito stipris bendruoju atveju gali būti užrašytas taip:

$$\sigma_{sfrc} = \sigma_c (1 - V_f) + \sigma_f V_f = E_c \varepsilon (1 - V_f) + E_f \varepsilon V_f;$$

o deformacijų modulis:

$$E_{sfrc} = E_c (1 - V_f) + E_f V_f.$$

Šios formulės tinka tik kompozitams su taisyklingai orientuotais intarpais, todėl praktikoje norint įvertinti priimto kompozitinės medžiagos modelio nukrypimą nuo realios medžiagos, yra naudojami tam tikri matricos ir intarpų darbo įvertinimo koeficientai. Todėl kompozito stiprio ir deformacijų modulio skaičiavimo formulės bendruoju atveju įgauna tokią išraišką:

$$\sigma_{sfr} = \sigma_c(1 - V_f)k_c + \sigma_f V_f k_f;$$

čia k_c – betono matricos darbo sąlygų kompozite koeficientas, k_f – intarpų darbo sąlygų kompozite koeficientas.

Intarpų darbo sąlygų kompozite koeficientas k_f yra išvestinis iš keleto kitų koeficientų, nusakančių tam tikrus kompozitinės medžiagos ypatumus (pvz., fibrų rūšį, jų savybes, inkaravimosi betono matricoje savybes, kertančių skaičiuojamąją plokštumą fibrų kiekį ir t.t.) ir paprastai nustatomas iš eksperimentinių tyrimų. Tačiau vienodų skaitinių šių koeficientų reikšmių negauta: polinkio kampą vertinantys koeficientai kinta nuo $\pi/2$ iki $(\pi/2)^2$, chaotiškumą – nuo $\pi/2$ iki $1/2$, užsiinkaravimas taip pat vertinamas skirtingai (Šalna 2008).

Bendras matricos ir fibrų darbas kompozite priklauso nuo jų savybių ir ryšio tarp jų. Kai kompozitas yra veikiamas išorės poveikių, ryšiais įtempiai yra perduodami fibroms per betono matricą. Jeigu fibros ilgis l_f , skersmuo d_f ir jos plotas A_f , tai mechaninės pusiausvyros lygtis ruože, atstumu x nuo jos galo, bus (Marčiukaitis 1998):

$$\sigma_x A_f = \int_0^x \tau(x) \pi d_f dx + \sigma_c A_f,$$

čia $\sigma_x A_f$ – tempimo jėga, kurią perduoda intarpui ruože x likusioji dalis; $\int_0^x \tau(x) \pi d_f dx$ – tempimo jėgos dalis, perduodama šlyties įtempių (tarp fibrų ir matricos paviršių); $\sigma_c A_f$ – tempimo jėgos dalis, kurią į intarpų galus perduoda matricos normaliniai įtempiai. Įtempiai matricos galuose lygūs įtempiams matricoje. Tolstant nuo fibros galo, pirmoji šios formulės sudedamoji dalis didėja. Į antrąją dalį galima neatsižvelgti tada, kai intarpai labai ploni ir ilgi, t.y. kai $A_f \ll \pi d_f x$. Įtempiai intarpe didėja, kol pasiekia reikšmę $x = l_{an}$. Kai $x > l_{an}$, apkrova, kurią perima intarpai, tampa didžiausia ir:

$$\sigma_x A_f = E_f \varepsilon_f A_f = \int_0^{l_{an}} \tau(x) \pi d_f dx.$$

Jeigu matrica yra plastiška, tai $\tau(x) \approx \tau_c$ ir

$$\varepsilon_f E_f A_f = \tau_c \pi d_f l_{an}.$$

Ši formulė rodo, kad l_{an} yra ε_f funkcija ir kartu suteiktą kompozitui įtempių dydžio funkcija. Maksimalūs įtempiai, kuriuos gali perimti intarpai, yra lygūs jo stipriui, t.y:

$$(\varepsilon_f E_f)_{\max} = \sigma_{f,\lim}.$$

Iš šių formulių galime nustatyti intarpo inkaravimosi ilgį:

$$l_{an} = \frac{\sigma_{f,\lim} d_f}{4\tau_c}.$$

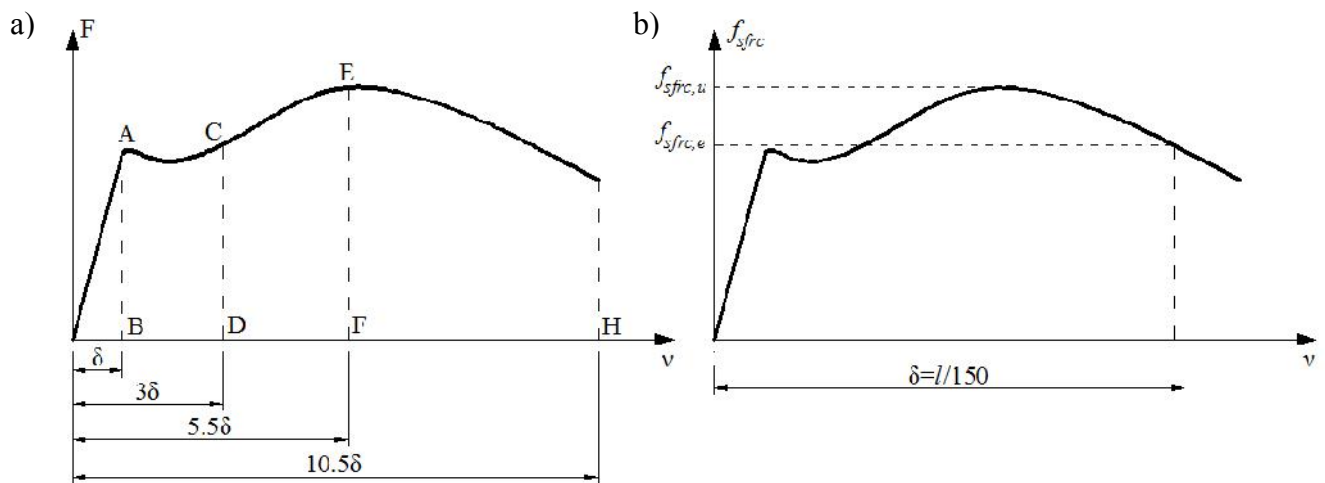
Didžiausi įtempiai, kuriuos perima fibros, yra ties jų viduriu ir kai matrica plastiška:

$$\sigma_{f,\max} A_f = \tau_c \pi d_f \frac{l_f}{2}; \quad \sigma_{f,\max} = 2\tau_c \frac{l_f}{d_f}.$$

1.2. Reglamentuoti plieninėmis fibromis armuoto betono skaičiavimo metodai

Fibrobetono gaminių kokybei tikrinti yra sukurta daug metodikų, iš kurių labiausiai paplitęs yra amerikiečių standartas – ASTM C1018, japonų – JSCE-SF4, norvegų – NBP No.7 bei įvairios techninės rekomendacijos (Šalna 2008). Didžiojoje dalyje šių metodikų turi būti atliekami eksperimentiniai tyrimai, kuriuose bandomos etaloninės $150 \times 150 \times 450$ sijos ir nustatoma ne tik laikomoji galia bei ribiniai įtempiai, bet ir energija, kurią sugeria bandinys. Šią energiją įvertina apkrovos ir įlinkio diagramos ($F-v$) plotas. Eksperimentinių sijų įlinkis ribojamas nustatytomis ribinėmis reikšmėmis. Lenkiamų plieninėmis fibromis armuotų betoninių sijų stiprį apibūdinančių indeksų nustatymo diagramos pagal ASTM C1018 ir JSCE-SF4 standartus parodytos 2.1 pav., kur δ yra sijos įlinkis pirmo plyšio atsivėrimo metu.

ASTM C1018 standarte plieninėmis fibromis armuoto betono stiprio indeksai apskaičiuojami iš apkrovos ir įlinkio diagramos. Jie išreiškiami kaip energijos, esant tam tikram apsibrėžtam įlinkiui, ir energijos pirmo plyšio atsivėrimo metu, santykiai bei likutinių įtempių faktoriai, kurie charakterizuoja įtempių dydį, likusį po pirmo plyšio atsivėrimo.



2.1 pav. Lenkiamų plieninėmis fibromis armuotų betoninių sijų stiprį apibūdinančių indeksų nustatymo diagramos pagal: a – ASTM C1018; b – JSCE-SF4 standartą

Japonų standartas JSCE-SF4 yra daug paprastesnis už ASTM C1018 – eksperimentinė sija bandoma iki suirimo apkrovos, tada nustatomi ribiniai įtempiai $f_{sfr,c,u}$, sudaroma įtempių ir įlinkių diagrama (2.1 pav. b). Pagal reglamentuojamą ribinį įlinkį ($\delta = l/150$) ir įtempių ir įlinkių diagramą nustatoma ekvivalentinė plieninėmis fibromis armuoto betono stiprio reikšmė $f_{sfr,c,e}$. Tuomet plieninėmis fibromis armuotą betoną apibūdina du stiprio koeficientai – ribinis R_u ir ekvivalentinis R_e :

$$R_u = 100 \frac{f_{sfr,c,u}}{f_{ref}},$$

$$R_e = 100 \frac{f_{sfr,c,e}}{f_{ref}};$$

čia f_{ref} – lenkiamos betoninės sijos stipris.

1.3. Sijų, armuotų plieninėmis fibromis, įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelių apžvalga

Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimas pagal A. K. Sharma (1986) modelį

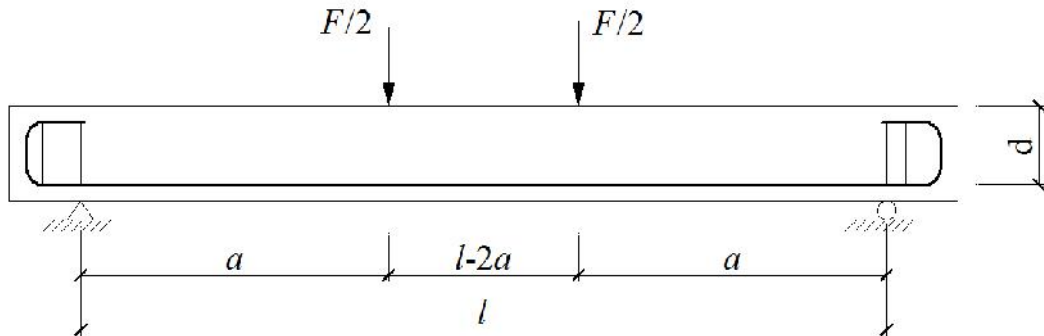
A. K. Sharma (1986) pasiūlė nesudėtingą empirinę įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo lygtį:

$$v_{cf} = k f_t \left(\frac{d}{a} \right)^{0.25},$$

čia d/a – naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis (2.2 pav.);

f_t – betono tempiamasis stipris skeliant;

k – konstanta, lygi 2/3.



2.2 pav. Laisvai atremtos sijos skaičiuojamoji schema

Sandauga $k f_t$ pasiūlyta remiantis Wrighto (Wright 1955) atliktais tyrimais. Autorius atrado, kad nustatant tempiamąjį stiprį skeliant 150×300 mm cilindrus, gaunamos 3/2 karto didesnės tempiamojo stiprio reikšmės nei gautos iš tiesioginio tempimo bandymų. Jis padarė išvadą, kad bandant cilindrus gaunami pastovesni rezultatai nei kitais tempimo bandymais.

Kai tempiamasis stipris skeliant nežinomas, autorius naudojo *European Concrete Committee* pasiūlytą empirinę priklausomybę, kurioje tempiamasis stipris skeliant susietas su gniuždomuoju stipriu:

$$f_t = 0,79 \sqrt{f_c},$$

čia f_c – betono cilindrinis gniuždomasis stipris.

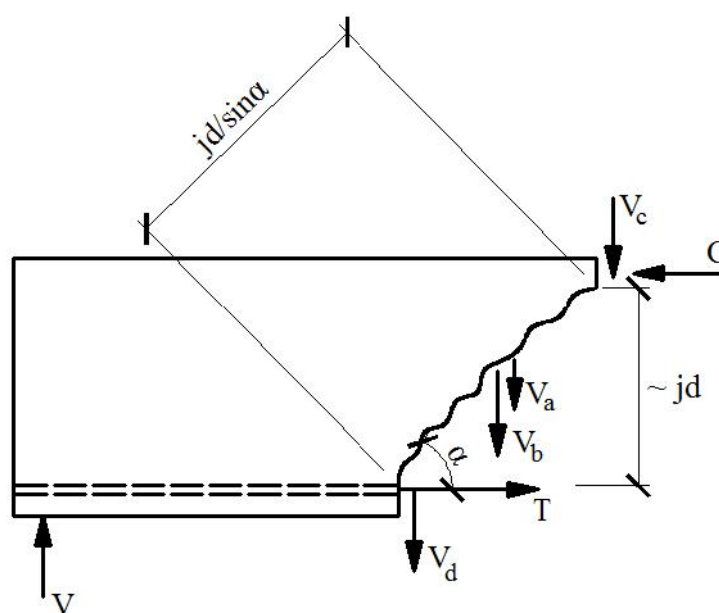
Šis modelis gana paprastas, tačiau jame nėra atsižvelgiama į fibrų kiekį, formą, išilginę armatūrą.

Autorius modelį patikrino palyginęs apskaičiuotus įstrižojo pjūvio stiprius su eksperimentiniais rezultatais, gautais išbandžius 41 siją. Eksperimentiškai nustatyto ir apskaičiuoto įstrižojo pjūvio stiprumo santykis yra 1,03, o vidutinis nuokrypis – 7,6 %.

Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimas pagal R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho modelį

R. Narayananas ir I. Y. S. Darwishas (Narayanan ir Darwish 1987) priimė, kad skersinei jėgai V priešinasi gniuždomosios zonos atstojamoji V_c , užpildų sukibimo jėgų atstojamoji V_a , pleišto efekto sukeltų jėgų atstojamoji V_d ir fibrų ištraukimo jėgų atstojamoji V_b (2.1 pav.). Suminė įstrižojo pjūvio laikomoji galia gali būti užrašyta taip:

$$V = V_a + V_b + V_c + V_d.$$



2.3 pav. Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimas pagal R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho (Narayanan ir Darwish 1987) modelį

Šiame modelyje ribinis įstrižojo pjūvio stipris susideda iš trijų narių (į užpildų sukibimą nebuvo atsižvelgta, kad formulę būtų galima pritaikyti fibromis armuotoms sijoms pagamintoms tiek iš skiedinio, tiek iš betono). Pirmasis pasiūlytos lygties narys įvertina fibrobetono atstojamąją, kuri gali būti išreikšta per tempiamąjį stiprį skeliant f_{sp} . Antruoju nariu atsižvelgiama į pleišto efektą, kuris sąlygojamas tempiamosios armatūros kiekio $\rho = \frac{A_s}{bd}$ bei jėgos peties ir naudingojo aukščio santykis a/d . Trečiuoju nariu įvertinama išilgai įstrižojo plyšio esančių fibrų ištraukimo jėgų atstojamoji v_b . Autoriai pasiūlė tokią sijų įstrižojo pjūvio stiprio išraišką:

$$v_u = e \left(A' f_{sp} + B' \rho \frac{d}{a} \right) + v_b = e A' f_{sp} + e B' \rho \frac{d}{a} + v_b,$$

čia A' – bedimensė konstanta, lygi 0,24;

B' – konstanta, lygi 80 N/mm^2 ;

e – bedimensis dydis, kuriuo atsižvelgiama į arkos efektą ir yra lygus:

$$e = 1,0, \text{ kai } a/d > 2,8,$$

$$e = 2,8d/a, \text{ kai } a/d \leq 2,8.$$

ρ – išilginės armatūros kiekis;

f_{sp} – tempiamasis stipris skeliant. Remdamiesi regresine analize (Narayanan ir Kareem-Palanjian 1984), tyrėjai pasiūlė tokią tempiamojo stiprio skeliant skaičiavimo formulę:

$$f_{sp} = \frac{f_{cuf}}{20 - \sqrt{F}} + 0.7 + \sqrt{F},$$

čia f_{cuf} – fibrobetonio kubinis gniuždomasis stipris;

F – fibrų faktorius, kuris apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$F = \frac{l_f}{d_f} V_f \beta,$$

čia l_f – fibros ilgis;

d_f – fibros skersmuo;

V_f – fibrų kiekis;

β – sukibimo koeficientas, kuris apvalioms fibroms imamas 0,5, banguotoms – 0,75, dantytoms – 1,0.

Atstojamoji v_b apskaičiuojama priėmus 45° plyšio posvyrio kampą (2.3 pav.) bei atsižvelgus į visų ši plyšį kertančių fibrų sukibimo įtempius τ ir fibrų rūšį:

$$v_b = 0,41\beta \frac{l_f}{d_f} V_f \tau = 0,41\tau F.$$

Sukibimo įtempiai τ buvo priimti remiantis Swamy'o ir kt. (Swamy et al. 1974) rekomendacijomis ir yra lygūs 4,15 MPa.

R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho (Narayanan ir Darwish 1987) modelyje atsižvelgiama į svarbiausius veiksnius, kurie turi įtakos fibrobetonio sijų įstrižojo pjūvio stipriui, todėl taikant lygtį gaunami patikimi rezultatai. Vidutinis autoriaus eksperimentiškai nustatyto ir apskaičiuoto 33 sijų ribinio įstrižojo pjūvio stiprumo santykis yra 1,11, o variacijos koeficientas – 12,98 %.

Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimas pagal S. A. Ashouro, G. S. Hasanaino, F. F. Wafa'o modelį

S. A. Ashouras, G. S. Hasanainas, F. F. Waf'as (Ashour *et al.* 1992) išbandė 18 didelio stiprio fibrobetonio sijų ir remdamiesi bandymų rezultatais pasiūlė dvi didelio stiprio fibrobetonio sijų įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo lygtis.

Pirmoji lygtis sudaryta modifikavus JAV projektavimo normose pateiktą įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo lygtį, papildomai įtraukiant jėgos peties ir naudingojo aukščio santykio a/d įtaką. Atlikus bandymo rezultatų regresinę analizę buvo pasiūlyta tokia lygtis:

$$v_u = (0,7\sqrt{f_c} + 7F)\frac{d}{a} + 17,2\rho\frac{d}{a},$$

čia 0,7 – daugiklis, atspindintis didelio stiprio betono elgseną;

F – Narayanano ir Darwisho pasiūlytas fibrų faktorius;

f_c – betono cilindrinis gniuždomasis stipris;

ρ – išilginės armatūros kiekis;

d/a – naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis.

Antroji lygtis panaši į Zsutty'o (Zsutty 1968) pasiūlytą lygtį, kuri buvo pritaikyta sunkiojo betono be fibrų įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimui, papildomai įtraukiant fibrų faktorių F :

Kai $a/d > 2,5$:

$$v_u = (2,11\sqrt[3]{f_c} + 7F)\left(\rho\frac{d}{a}\right)^{0,333}.$$

Kai $a/d < 2,5$:

$$v_u = \left[(2,11\sqrt[3]{f_c} + 7F)\left(\rho\frac{d}{a}\right)^{0,333} \right] \left(\frac{2,5d}{a} \right) + v_b \left(2,5 - \frac{a}{d} \right).$$

Aukštoms sijoms (kai $a/d < 2,5$) autoriai įtraukė papildomą komponentę v_b , kuria atsižvelgiama į fibrų kirpimo stiprį. Šią komponentę galima apskaičiuoti pagal Romualdi'o ir Mandelio (Romualdi ir Mandel 1964) pasiūlytą išraišką:

$$v_b = 0,41\tau F,$$

čia τ – ribiniai sukibimo įtempiai. Remiantis Swamy'o ir kt. (Swamy *et al.* 1974) rezultatais, šiame modelyje priimta, kad $\tau = 4,15 \text{ MPa}$. Taigi:

$$v_b = 1,7 \left(\frac{l_f}{d_f} \right) V_f \beta = 1,7 F.$$

Šiame modelyje naudoti parametrai sutampa su parametrais, naudotais R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho modelyje. Autoriai teigė, kad jų lygtys geriau tinka didelio stiprio betonui nei R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho lygtis. Modelio patikrinimui buvo paimti 139 bandinių bandymo rezultatai (Kwak *et al.* 2002). Vidutinis eksperimentiškai nustatyto ir apskaičiuoto ribinio įstrižojo pjūvio stiprumo santykis yra 1,12, o variacijos koeficientas – 21 %. Vis dėlto didesnei daliai bandinių tikslesnis buvo R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho modelis.

Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimas pagal V. C. Li, R. Wardo, A. M. Hamza modelį

Kurdami įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelį V. C. Li, R. Wardas ir A. M. Hamza (Li *et al.* 1992) rėmėsi Zsutty'o (Zsutty 1968) lygtimi. Atlikę bandymus autoriai padarė išvadą, kad ribiniui įstrižojo pjūvio stipriui didžiausią įtaką turi medžiagos lenkiamasis ir tempiamasis stipriai, jėgos peties ir naudingojo aukščio santykis a/d , armavimo koeficientas bei sijos aukštis. Autoriai pastebėjo, kad santykis a/d ir koeficientas ρ turi panašią įtaką tiek paprasto betono, tiek fibrobetono sijų stipriui. Panašiai kaip ir Zsutty'o lygtyje, buvo nuspręsta susieti ribinį įstrižojo pjūvio stiprį su

sandauga $\left(\rho \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}}$, kai $a/d \geq 2,5$. Jie pasiūlė tokią lygtį:

$$f_v = 1,25 + 4,68 \left[\left(f_f f_{sp} \right)^{\frac{3}{4}} \times \left(\rho \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \times (d)^{-\frac{1}{3}} \right], \quad \text{kai } a/d \geq 2,5,$$

čia f_f – lenkiamasis stipris;

f_{sp} – tempiamasis stipris skeliant;

ρ – išilginės armatūros kiekis;

d – naudingasis aukštis, mm;

d/a – naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis.

Formulėje esantis narys 1,25 įvertina įstrižojo pjūvio stiprumo padidėjimą dėl užpildų sukibimo ir tinka bet kokiam praktikoje pasitaikančiam betonui.

Autoriai padarė išvadą, kad kai jėgos peties ir naudingojo aukščio santykis $a/d \leq 2,5$, nesupleišėjusio betono tempiamasis stipris turi daug mažesnę įtaką ribinei apkrovai nei supleišėjusio betono stipris. Dėl šios priežasties buvo nuspręsta ribinį įstrižojo pjūvio stiprį susieti tik su lenkiamuoju stipriu. Jie pasiūlė tokią lygtį:

$$f_v = 9,16 \left[\left(f_f \right)^{\frac{2}{3}} \times (\rho)^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{d}{a} \right) \right], \text{ kai } a/d \leq 2,5.$$

Didžiausias šio modelio trūkumas yra tas, kad neįvertinamas fibrų kiekis ir forma.

Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimas pagal M. Khuntia, B. Stojadinoviciaus, S. C. Goelio modelį

M. Khuntia, B. Stojadinovicius, S. C. Goelis (Khuntia *et al.* 1999) pasiūlė universalią įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo formulę, kuri tinka visiems dažniausiai praktikoje pasitaikantiems betono stipriams (nuo 20 iki 100 MPa), fibrų faktoriaus reikšmėms (nuo 0,25 iki 2) bei jėgos peties ir naudingojo aukščio santykiams (nuo 0,5). Šiame modelyje betono atstojamoji, kuri sudaryta iš gniuždomosios zonos betono, užpildų sukibimo ir pleišto efekto atstojamųjų, apskaičiuojama panaudojus JAV projektavimo normose pateiktą formulę:

$$v_c = 0,167 \sqrt{f_c},$$

čia f_c – betono cilindrinis gniuždomasis stipris.

Fibrų atstojamosios skaičiavimas paremtas supleišėjusio betono tempimo stipriu, kuris gali būti išreikštas taip:

$$\sigma_{pc} = A\beta\tau V_f \frac{l_f}{d_f} = A\tau F_1,$$

čia A – bedimensė konstanta, kuri lygi 0,41;

τ – fibros ir matricos sukibimo stipris;

F_1 – fibrų faktorius, išreiškiamas taip:

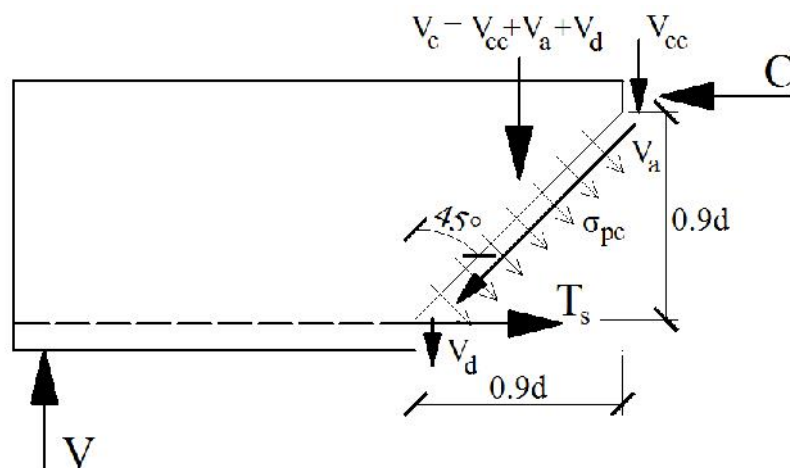
$$F_1 = \beta V_f \frac{l_f}{d_f},$$

čia V_f – fibrų kiekis;

l_f – fibros ilgis;

d_f – fibros skersmuo;

β – koeficientas, priklausantis nuo fibros formos ir betono rūšies. Imamas lygus 1 lenktoms ar susuktoms plieninėms fibroms, 2/3 kai naudojamos tiesios apvalios fibros ir sunkusis betonas, 3/4 kai naudojamos lenktos ar susuktos plieninės fibros ir lengvasis betonas. Koeficientas β turi panašią prasmę kaip ir Narayanano ir Darwisho (Narayanan ir Darwish 1987) pasiūlytas sukibimo koeficientas.



2.4 pav. Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimas pagal M. Khuntia, B. Stojadinoviciaus, S. C. Goelio (Khuntia *et al.* 1999) modelį

Priėmus, kad sukibimo stipris $\tau = 0,68\sqrt{f_c}$, o plyšio posvyrio kampas yra 45° (2.4 pav.), fibrų atstojamoji gali būti apskaičiuojama taip:

$$v_{fr} = 0,9 \times \sigma_{pc} = 0,9 \times 0,41 \times 0,68\sqrt{f_c} F_1 = 0,25 F_1 \sqrt{f_c}.$$

I narį v_c įtraukus arkos efekto koeficientą $\alpha (= 2.5d/a < 3$, kai $a/d < 2.5$), ribinis fibrobetonio sijų įstrižojo pjūvio stiprumas gali būti išreikštas taip:

$$v_{frc} = v_c + v_{fr} = 0,167\alpha\sqrt{f_c} + 0,25F_1\sqrt{f_c} = (0,167\alpha + 0,25F_1)\sqrt{f_c}.$$

Šis modelis patogus tuo, kad gali būti pritaikytas bet kokio stiprio betonui.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados

1. Plieninėmis fibromis armuoto betono stiprumo apskaičiavimo metodų apžvalga rodo, kad stiprio nustatymas yra skirtingas, daugeliu atvejų turi būti paremtas eksperimentiniais tyrimais, todėl juos sudėtinga pritaikyti praktiniam kompozitų projektavimui, o apskaičiuoti rezultatai taip pat gaunami skirtingi.
2. Šių, armuotų plieninėmis fibromis, įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelių apžvalga parodė, kad nėra bendros skaičiavimo metodikos. Įvairiuose modeliuose įstrižojo pjūvio stipris siejamas su tam tikra betono stiprio charakteristika: tempiamuoju stipriu skeliant (Sharma 1986, Narayanan ir Darwish 1987), gniuždomuoju stipriu (Ashour *et al.* 1992, Khuntia *et al.* 1999), tempiamuoju stipriu skeliant ir lenkiamuoju stipriu (Li *et al.* 1992). Kaip rodo pačių autorių pateikti rezultatai, visų modelių tikslumas yra skirtingas ir varijuoja taip: sisteminė paklaida – nuo 1,03 iki 1,12; atsitiktinė – nuo 7,6 iki 21 %.

2. ĮSTRIŽOJO PJŪVIO STIPRUMO SKAIČIAVIMO MODELIŲ ANALIZĖ

2.1. Įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelių parametrinė analizė

Visi apžvelgti modeliai yra empiriniai ar pusiau empiriniai, sukurti analizuojant atliktų eksperimentinių bandymų rezultatus ir remiantis ankstesnių autorių darbais. Vyraujantys parametrai, į kuriuos atsižvelgiama visuose modeliuose, yra naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis d/a (arba a/d) ir betono stipris. Visgi šie parametrai vertinami skirtingai. A. K. Sharma (1986), R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho (Narayanan ir Darwish 1987) modeliuose kaip geriausiai betono savybes atspindintis parametras imamas betono tempiamasis stipris skeliant, S. A. Ashouro *ir kt.* (Ashour *et al.* 1992) ir M. Khuntia *ir kt.* (Khuntia *et al.* 1999) modeliuose – betono cilindrinis gniuždomasis stipris, o V. C. Li *ir kt.* (Li *et al.* 1992) modelyje – tempiamasis stipris skeliant ir lenkiamasis stipris. Fibrų rūšis įvertinama per sukibimo koeficientą β (Narayanan ir Darwish 1987, Ashour *et al.* 1992, Khuntia *et al.* 1999). Skaičiavimo modelių parametrinis palyginimas pateiktas 3.2-3.5 lentelėse ir 3.2-3.5 pav.

Visi autoriai, išskyrus M. Khuntia *ir kt.* (Khuntia *et al.* 1999), kurdami modelius atliko eksperimentinius bandymus, kurių rezultatai bei palyginimas su apskaičiuotomis reikšmėmis pateikti 3.1 lentelėje. Bandymuose buvo naudotos banguotos ir lenktos fibros, kurių kiekis V_f kinta nuo 0,25 % iki 1,5 %, o ilgio ir skersmens santykis l_f/d_f yra nuo 60 iki 133. Išilginės armatūros kiekis ρ bandymuose kinta nuo 1,1 % iki 5,72 %, santykis a/d nuo 1,0 iki 4,0, o betono gniuždomasis stipris – nuo 22,7 MPa iki 99 MPa.

3.1 lentelė. Bandytų sijų duomenų santrauka bei eksperimentinių ir apskaičiuotų sijų įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmių palyginimas

Tyrėjas	Fibrų rūšis	V_f , %	l_f/d_f	ρ , %	d , mm	a/d	f_c , MPa	v_0 , MPa	v_{frc} , MPa	v_0/v_{frc}
A. K. Sharma (Sharma 1986)	H	0,96	80	1,47	263	1,9	48,6	3,03	3,69	0,82
R. Narayananas ir I. Y. S. Darwishas (Narayanan ir Darwish 1987)	C	0,25	100	2,0	130	2,0	61	2,96	2,91	1,02
		0,25	100	2,0	130	3,0	61	2,77	1,89	1,47
		0,25	100	2,0	130	2,0	39,2	2,71	2,53	1,07
		0,25	100	2,0	130	3,0	39,2	1,94	1,63	1,19
		0,5	133	2,0	130	3,0	36	1,97	2,26	0,87
		1,0	100	2,0	130	3,0	36	2,97	2,72	1,09
		0,5	133	2,0	130	3,5	49	2,61	2,35	1,11
		1,0	133	2,0	130	2,0	57,4	5,57	4,60	1,21
		0,5	133	3,69	130	3,0	36	2,24	2,70	0,83
		0,5	133	5,72	130	3,1	36	2,33	3,19	0,73
		1,0	133	3,69	130	3,0	57,4	4,37	4,00	1,09

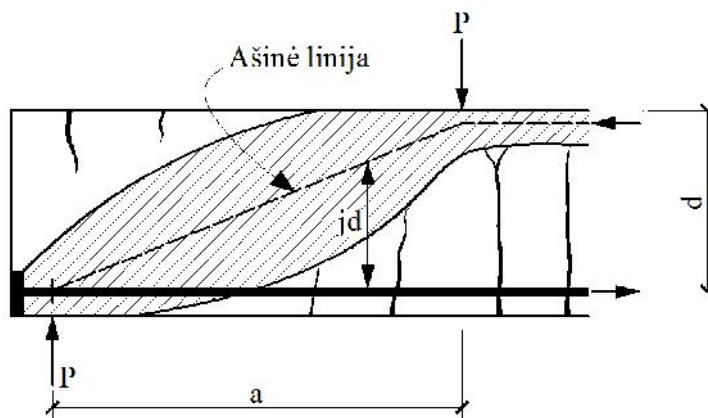
		1,0	133	5,72	130	3,1	57,4	5,0	4,49	1,11
S. A. Ashouras ir kt. (Ashour et al. 1992)	H	0,5	75	2,84	215	1,0	99	9,09	9,42	0,96
		0,5	75	2,84	215	2,0	99	4,82	4,71	1,03
		1,0	75	2,84	215	1,0	95	12,74	11,25	1,13
		1,0	75	2,84	215	2,0	95	6,06	5,63	1,08
		1,5	75	2,84	215	1,0	96	13,95	13,27	1,05
		1,5	75	2,84	215	2,0	96	7,21	6,64	1,09
		1,0	75	4,58	215	2,0	94	6,73	5,76	1,17
		1,0	75	4,58	215	4,0	94	3,88	2,88	1,35
V. C. Li ir kt. (Li et al. 1992)	C ir H	1,0	60	2,2	102	3,0	22,7	3,16	5,08	0,62
		1,0	60	1,1	102	3,0	22,7	2,43	4,29	0,57
		1,0	60	1,1	102	1,5	22,7	5,64	6,39	0,88
		1,0	100	2,2	102	3,0	26	3,55	5,66	0,63
		1,0	60	2,2	204	3,0	22,7	3,05	4,29	0,71
		1,0	100	2,2	204	3,0	26	3,05	4,75	0,64

Pastabos: (1) C ir H – banguotos ir lenktos fibros; l/d_f – fibros ilgio ir skersmens santykis; V_f – fibrų kiekis;

(2) ρ – išilginės armatūros kiekis; d – sijos naudingasis aukštis; a – jėgos petys; f_c – betono gniuždomasis stipris; v_0 – autorių eksperimentiškai nustatytas įstrižojo pjūvio stipris; v_{fc} – įstrižojo pjūvio stipris, nustatytas autorių siūlomomis formulėmis.

Jėgos peties ir naudingojo aukščio santykio įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose

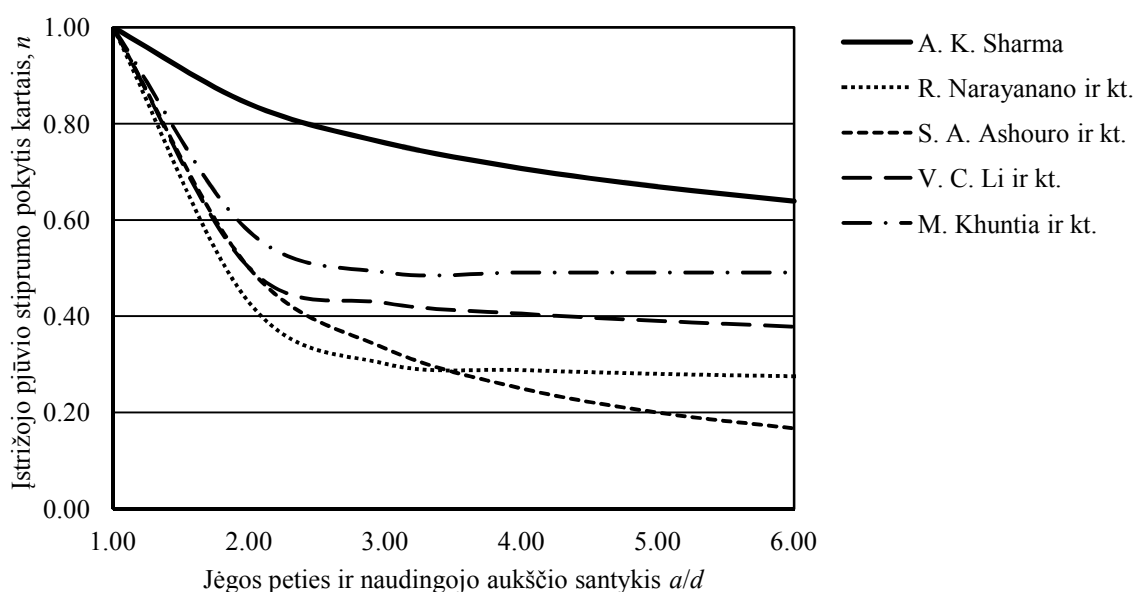
Jėgos peties ir naudingojo aukščio santykio įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui visuose modeliuose vertinama skirtingai. Iš modelių grafinio palyginimo (3.2 pav.) galima daryti išvadą, kad sijos su mažesniu a/d santykiu atlaiko didesnę skersinę jėgą. Taip yra dėl arkos efekto, kai pridėtos apkrovos perduodamos tiesiogiai į atramas. 3.1 pav. pavaizduotas idealizuotoje sijoje atsirandantis arkos efektas, kai užtikrinamas pilnas tempiamosios armatūros sukibimas su betonu. Užbrūkšniuotas plotas rodo, kuriose vietose betonas yra gniuždomas, o už užbrūkšniuoto ploto esantis betonas gali supleišėti. Įstrižųjų gniuždymo įtempių intensyvumas priklauso nuo arkos ašinės linijos, pažymėtos 3.1 pav. punktyrine linija, posvyrio kampo. Ši posvyrį apibūdina jėgos peties ir naudingojo aukščio santykis a/d . Akivaizdu, kad ilgose sijose arkos posvyrio kampas yra mažesnis. Apžvelgtuose modeliuose priimta, kad arkos efektas atsiranda trumpose sijose, t.y. kai jėgos peties ir naudingojo aukščio santykis yra mažesnis nei 2,8 (Narayanan ir Darwish 1987), arba 2,5 (Ashour et al. 1992, Li et al. 1992). Didžiausią įtaką santykis a/d turi S. A. Ashouro ir kt. (Ashour et al. 1992) modelyje (santykį a/d padidinus 4 kartus, įstrižojo pjūvio stiprumas sumažėja 4 kartus). Mažiausią įtaką šis parametras turi A. K. Sharma (1986) modelyje (a/d padidinus 4 kartus, įstrižojo pjūvio stiprumas sumažėja 1,41 karto).



3.1 pav. Trumpose sijose atsirandantis arkos efektas (Park ir Paulay 1975)

3.2 lentelė. Jėgos peties ir naudingojo aukščio santykio a/d įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui

	Įstrižojo pjūvio stiprumo pokytis kartais, n				
$\frac{a}{d}$	A. K. Sharma (1986)	R. Narayananas ir I. Y. S. Darwishas (1987)	S. A. Ashouras ir kt. (1992)	V. C. Li ir kt. (1992)	M. Khuntia ir kt. (1999)
1	1	1	1	1	1
2	0.841	0.428	0.500	0.500	0.576
3	0.760	0.301	0.333	0.427	0.491
4	0.707	0.288	0.250	0.405	0.491
5	0.669	0.280	0.200	0.390	0.491
6	0.639	0.275	0.167	0.378	0.491



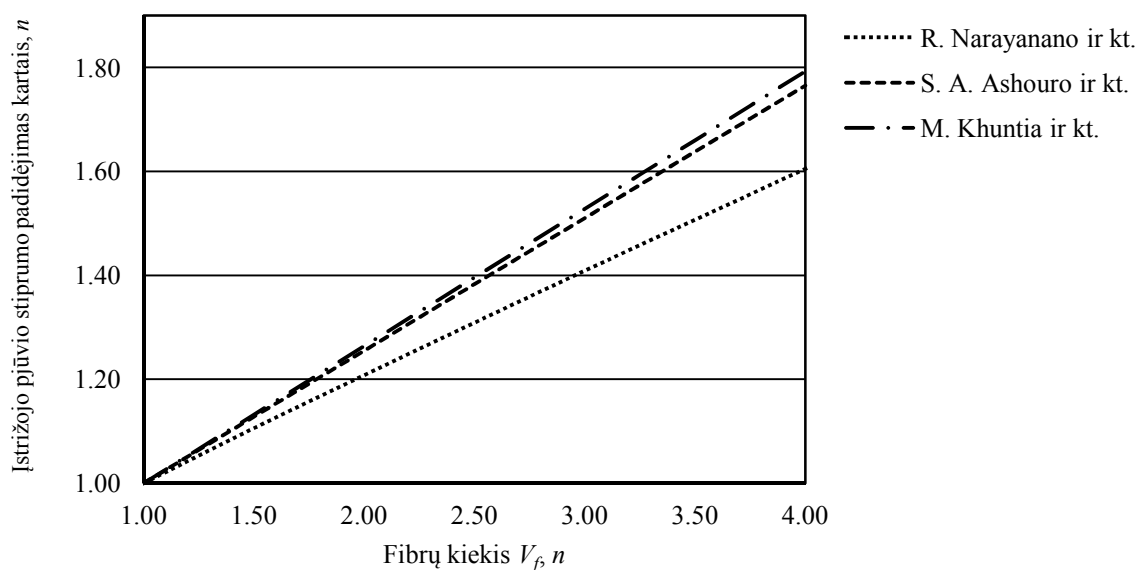
3.2 pav. Jėgos peties ir naudingojo aukščio santykio a/d įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui (pradiniai duomenys: $f_c = 40 \text{ MPa}$; $V_f = 0,5 \%$; $\rho = 1,0 \%$; $a/d = 1,0$; $l/d = 60$)

Fibrų kiekio įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose

Fibrų kiekio įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui yra įtraukta į fibrų faktorių F (Narayanan ir Darwish 1987, Ashour *et al.* 1992) ir F_l (Khuntia *et al.* 1999). Iš grafinio palyginimo (3.3. pav.) matyti, kad šiuose modeliuose fibrų kiekio ir įstrižojo pjūvio stiprumo priklausomybė yra tiesinė. Didžiausią įtaką fibrų kiekis turi M. Khuntia *ir kt.* (1999) modelyje (fibrų kiekį padidinus 4 kartus, įstrižojo pjūvio stiprumas padidėja 1,79 karto). Mažiausią įtaką šis parametras turi R. Narayanan ir I. Y. S. Darwisho (1987) modelyje (fibrų kiekį padidinus 4 kartus, įstrižojo pjūvio stiprumas padidėja 1,61 karto).

3.3 lentelė. Fibrų kiekio V_f įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui

	Įstrižojo pjūvio stiprumo padidėjimas kartais, n				
V_f, n	A. K. Sharma (1986)	R. Narayananas ir I. Y. S. Darwishas (1987)	S. A. Ashouras <i>ir</i> <i>kt.</i> (1992)	V. C. Li <i>ir kt.</i> (1992)	M. Khuntia <i>ir kt.</i> (1999)
1,0	-	1	1	-	1
1,5	-	1,106	1,128	-	1,132
2,0	-	1,208	1,255	-	1,264
2,5	-	1,309	1,383	-	1,396
3,0	-	1,409	1,510	-	1,528
3,5	-	1,507	1,638	-	1,660
4,0	-	1,605	1,765	-	1,793



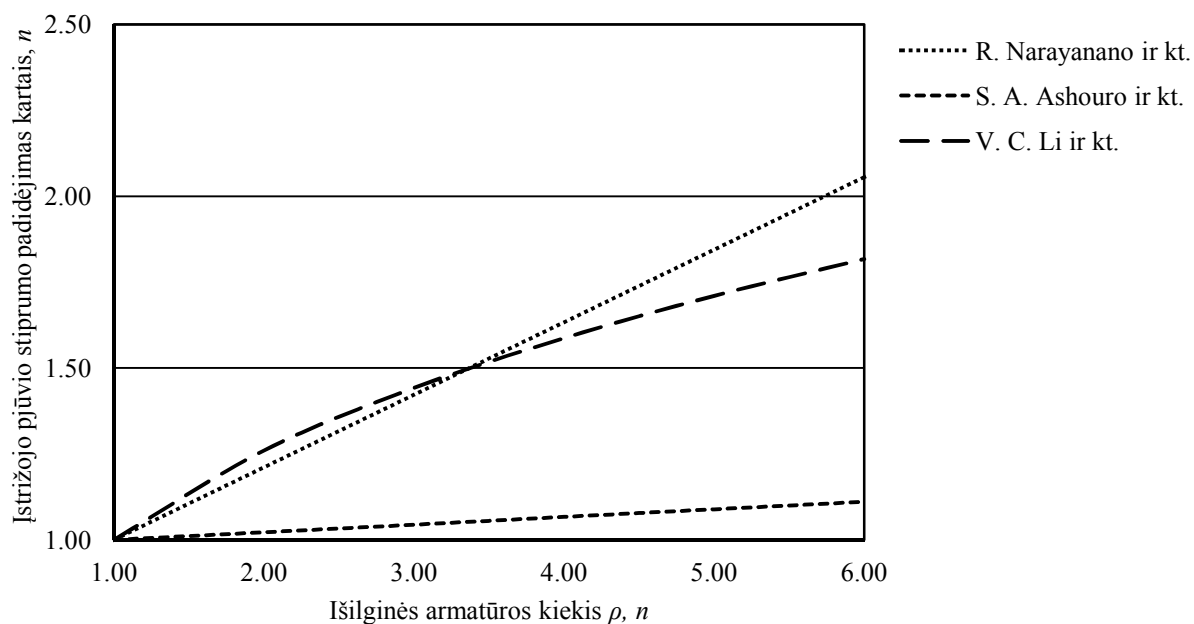
3.3 pav. Fibrų kiekio įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui (pradiniai duomenys: $f_c = 40 \text{ MPa}$; $V_f = 0,5 \%$; $\rho = 1,0 \%$; $a/d = 2,0$; $l/d = 60$)

Išilginės armatūros įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose

Stiprio padidėjimą dėl išilginės armatūros lemia pleišto efektas, kuris priklauso nuo išilginės armatūros kiekio. Didžiausią įtaką sijų įstrižojo pjūvio stiprumui išilginė armatūra turi R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho modelyje (išilginės armatūros kiekį padidinus 4 kartus, įstrižojo pjūvio stiprumas padidėja 1,63 karto). Mažiausią įtaką šis parametras turi S. A. Ashouro *ir kt.* modelyje, kur stiprumo padidėjimas dėl išilginės armatūros yra labai mažas (išilginės armatūros kiekį padidinus 4 kartus, įstrižojo pjūvio stiprumas padidėja tik 1,07 karto).

3.4 lentelė. Išilginės armatūros įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui

	Įstrižojo pjūvio stiprumo padidėjimas kartais, n				
ρ, n	A. K. Sharma (1986)	R. Narayananas ir I. Y. S. Darwishas (1987)	S. A. Ashouras <i>ir kt.</i> (1992)	V. C. Li <i>ir kt.</i> (1992)	M. Khuntia <i>ir kt.</i> (1999)
1	-	1	1	1	-
2	-	1,211	1,022	1,260	-
3	-	1,422	1,044	1,442	-
4	-	1,633	1,067	1,587	-
5	-	1,844	1,089	1,710	-
6	-	2,055	1,111	1,817	-



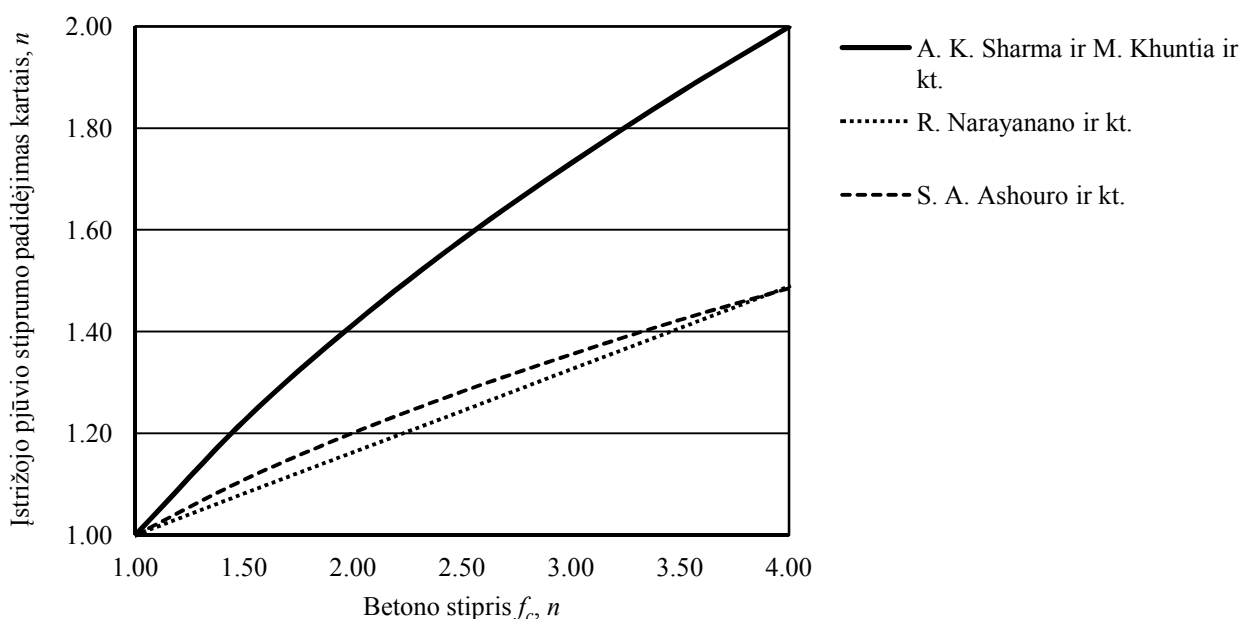
3.4 pav. Išilginės armatūros įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui (pradiniai duomenys: $f_c = 40 \text{ MPa}$; $V_f = 1,0 \%$; $\rho = 1,0 \%$; $a/d = 2,0$; $l/d = 60$)

Betono stiprio įtakos vertinimas įvairiuose modeliuose

Didžiausią įtaką betono stipris turi A. K. Sharma ir M. Khuntia *ir kt.* modeliuose, kuriuose įstrižojo pjūvio stiprumo padidėjimas dėl betono stiprio yra proporcingas $\sqrt{f_c}$ (betono stiprį padidinus 4 kartus, įstrižojo pjūvio stiprumas padidėja 2,00 karto). Mažiausią įtaką šis parametras turi S. A. Ashouro *ir kt.* ir R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho modeliuose (betono stiprį padidinus 4 kartus, įstrižojo pjūvio stiprumas padidėja 1,49 karto).

3.5 lentelė. Betono stiprio įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui

	Įstrižojo pjūvio stiprumo padidėjimas kartais, n				
f_c, n	A. K. Sharma (1986)	R. Narayananas ir I. Y. S. Darwishas (1987)	S. A. Ashouras <i>ir kt.</i> (1992)	V. C. Li <i>ir kt.</i> (1992)	M. Khuntia <i>ir kt.</i> (1999)
1,0	1	1	1	-	1
1,5	1,225	1,082	1,109	-	1,225
2,0	1,414	1,163	1,201	-	1,415
2,5	1,581	1,244	1,282	-	1,582
3,0	1,731	1,326	1,355	-	1,733
3,5	1,870	1,407	1,423	-	1,872
4,0	1,999	1,489	1,485	-	2,000



3.5 pav. Betono stiprio įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui (pradiniai duomenys: $f_c = 20 \text{ MPa}$; $V_f = 1,0 \%$; $\rho = 1,0 \%$; $a/d = 2,0$; $l/d = 60$)

2.2. Antrojo skyriaus išvados

1. Kaip rodo atlikta analizė, visi apžvelgti modeliai yra empiriniai ar pusiau empiriniai, sukurti analizuojant atliktų eksperimentinių baidymų rezultatus ir remiantis ankstesnių autorių darbais. Tai rodo, kad modeliai tiesiogiai neatspindi realaus suirimo charakterio. Vyraujantys parametrai, į kuriuos atsižvelgiama visuose nagrinėtuose modeliuose, yra naudingo aukščio ir jėgos peties santykis d/a (arba a/d) ir betono stipris.
2. Atlikta penkių įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelių parametrinė analizė. Buvo analizuojama vyraujančių parametru (jėgos peties ir naudingo aukščio santykio, fibrų, išilginės armatūros kiekio, betono stiprio) įtaka skaičiavimo rezultatams. Nustatyta, kad didžiausią įtaką sijų, armuotų plieninėmis fibromis, įstrižojo pjūvio stiprumui turi jėgos peties ir naudingo aukščio santykis a/d . Santykio a/d padidinimas 4 kartais įstrižojo pjūvio stiprumą įvairiuose modeliuose sumažina 1,41-4,0 karto.
3. Kiti parametrai, tokie kaip fibrų kiekis, išilginės armatūros kiekis ir betono stipris yra mažiau reikšmingi nei santykis a/d : vidutiniškai padidinus šiuos parametrus iki 4 kartų, įstrižojo pjūvio stiprumas padidėja nuo 1,1 iki 2,0 karto. Deja, visuose modeliuose šie parametrai taip pat vertinami skirtingai.
4. Atlikus parametrinę analizę nustatyta, kad visuose modeliuose fibrų kiekio įtaka vertinama tiesine priklausomybe, tačiau skirtingai. Didžiausia fibrų kiekio įtaka išryškėjo S. A. Ashouro *ir kt.* ir M. Khuntia *ir kt.* modeliuose, o mažiausia – R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho modelyje.

3. EKSPERIMENTINĖ DALIS

Kaip parodė teorinėje dalyje nagrinėti įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modeliai, visi parametrai (plieninių fibrų kiekis, išilginės armatūros kiekis, betono stipris, jėgos peties ir naudingojo aukščio santykis) vertinami skirtingai. Tai sąlygoja skirtingus galutinius teorinius rezultatus. Be to, išsiskiria autorių nuomonės, kokiam fibrų kiekiui esant suirimas įstrižajame pjūvyje tampa plastiškas. Todėl yra tikslinga atlikti papildomus eksperimentinius tyrimus šiai problemai išspręsti.

Eksperimentinėje programoje buvo tiriamos plieninėmis DRAMIX RC-80/60-BN fibromis armuoto betono savybės. Programą sudarė trys serijos su vienodomis betono teslos sudėtimis, bet skirtingu fibrų kiekiu: kontrolinė serija C ($V_f = 0\%$), SFRC_0,75 serija ($V_f = 0,75\%$) ir SFRC_1,5 serija ($V_f = 1,5\%$). Betono sudėtis parodyta 4.1 lentelėje. Vandens ir cemento santykis tesloje – 0,53.

4.1 lentelė. Betono sudėtis

Medžiagos pavadinimas	Medžiagos kiekis, kg/m ³
Cementas (42,5N)	320
Smėlis (0..4 mm)	773
Žvirgždas (4-16 mm)	1180
Vanduo	171
Dispersinė armatūra DRAMIX RC-80/60-BN	0; 58,88; 117,75

Kiekvieną seriją sudarė dvi sijos ir bandiniai medžiagų fizikinėms-mechaninėms savybėms nustatyti: keturi kubai ir keturios priзмės. Visi bandiniai pagaminti iš vienodos sudėties betono teslos, kuri buvo padalinta į tris lygias dalis: C serijai (be fibrų), SFRC_0,75 serijai (papildomai įdedant 58,9 kg/m³ fibrų) ir SFRC_1,5 serijai (papildomai įdedant 117,8 kg/m³ fibrų).

3.1. Betono, armuoto plieninėmis fibromis, gniuždymo stiprio nustatymas

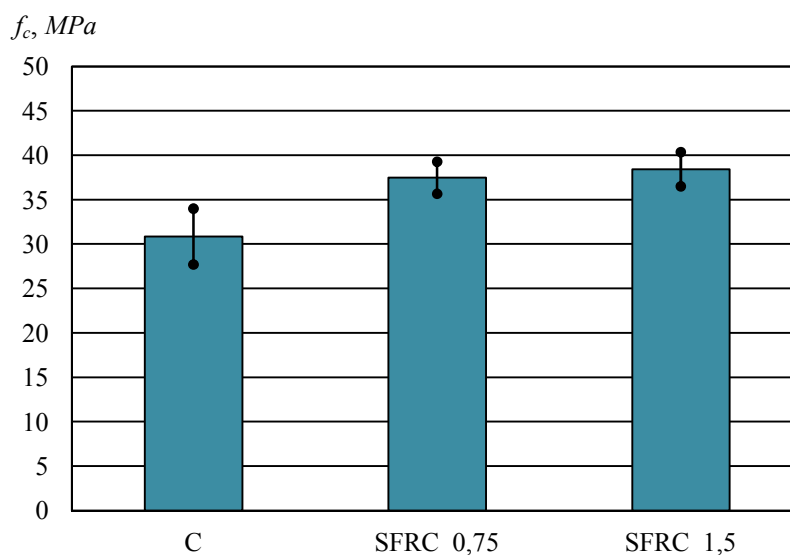
Siekiant nustatyti gniuždymo stiprį, buvo bandomi standartiniai $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ kubai, po keturis bandinius kiekvienoje serijoje. Bandymo rezultatai pateikti 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Plieninėmis fibromis armuoto betono gniuždymo stiprio eksperimentinės reikšmės

Serija	Bandinio pav.	V_f , %	$f_{cube,i}$, MPa	$f_{cube,vid}$, MPa	Kvadratinė nuokrypa, MPa	Variacijos koeficientas	$f_{cube,k}$, MPa
C	C-1	0	30,13	30,85	1,944	0,0630	27,7
	C-2	0	29,68				
	C-3	0	29,83				
	C-4	0	33,75				
SFRC_0,75	SFRC_0,75-1	0,75	38,72	37,47	1,101	0,0294	35,7
	SFRC_0,75-2	0,75	37,00				
	SFRC_0,75-3	0,75	-				
	SFRC_0,75-4	0,75	36,67				
SFRC_1,5	SFRC_1,5-1	1,5	39,35	38,43	1,176	0,0306	36,5
	SFRC_1,5-2	1,5	39,29				
	SFRC_1,5-3	1,5	38,25				
	SFRC_1,5-4	1,5	36,84				

Pastabos:

- (1) $f_{cube,i}$ – bandinio kubinis gniuždomasis stipris; $f_{cube,vid}$ – serijos vidutinis kubinis gniuždomasis stipris; $f_{cube,k}$ – serijos charakteristinis kubinis gniuždomasis stipris



4.1 pav. Skirtingų serijų bandinių vidutinio kubinio gniuždymo stiprio palyginimas su 95 % pasikliautimumu

Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad plieninės fibros ženkliai patidina betono gniuždomąjį stiprį: įmaišius į betoną 0,75 % ir 1,5 % plieninių fibrų, gniuždomasis stipris padidėja atitinkamai 21,5 % ir 24,6 % (4.1 pav.).

3.2. Plieninėmis fibromis armuotų prizmių lenkimo bandymas

Plieninėmis fibromis armuoto betono lenkimo stipris nustatytas bandant $100 \times 100 \times 400$ mm prizmes (4.3 pav.). Buvo bandomos trys serijos prizmių su skirtingais fibrų kiekiais ($V_f = 0$ %, $V_f = 0,75$ % ir $V_f = 1,5$ %). Kiekvieną seriją sudarė po keturis bandinius. Apkrovos kėlimo greitis – 0,1 kN/s. Visų fibromis armuotų bandinių viduryje kas 0,1 sekundės buvo matuojamas įlinkis. Turint apkrovos ir įlinkio diagramą, pagal ASTM C1018 ir JSCE-SF4 standartus nustatytos ribinės apkrovos reikšmės ir lenkiamasis stipris. Bandymo rezultatai pateikti 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė. Lenkiamų bandinių bandymo rezultatai

Bandinio pav.	V_f , %	F_{cr} , kN	F_u , kN		f_{cf} , MPa	
			ASTM C1018	JSCE-SF4	ASTM C1018	JSCE-SF4
C-1	0	-	12,15		5,457	
C-2	0	-	12,36		5,469	
C-3	0	-	11,70		5,313	
C-4	0	-	14,74		6,593	
SFRC_0.75-1	0,75	13,80	20,31	-	9,213	-
SFRC_0.75-2*	0,75	13,70	-	-	-	-
SFRC_0.75-3*	0,75	15,98	-	-	-	-
SFRC_0.75-4	0,75	13,41	19,94	19,94	8,937	8,937
SFRC_1.5-1	1,5	16,75	24,31	24,31	10,69	10,69
SFRC_1.5-2	1,5	16,80	21,56	21,25	9,790	9,649
SFRC_1.5-3	1,5	16,80	21,27	21,27	9,355	9,355
SFRC_1.5-4	1,5	14,33	20,73	20,71	9,422	9,413

Pastabos:

- (2) * Eksperimentas nutrūko bandymo mašinai automatiškai sustabdžius bandymą;
- (3) F_{cr} – pleišėjimo jėga; f_{cf} – betono lenkiamasis stipris, kuris pagal EN 12390-5 apskaičiuojamas taip:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F_u \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2},$$

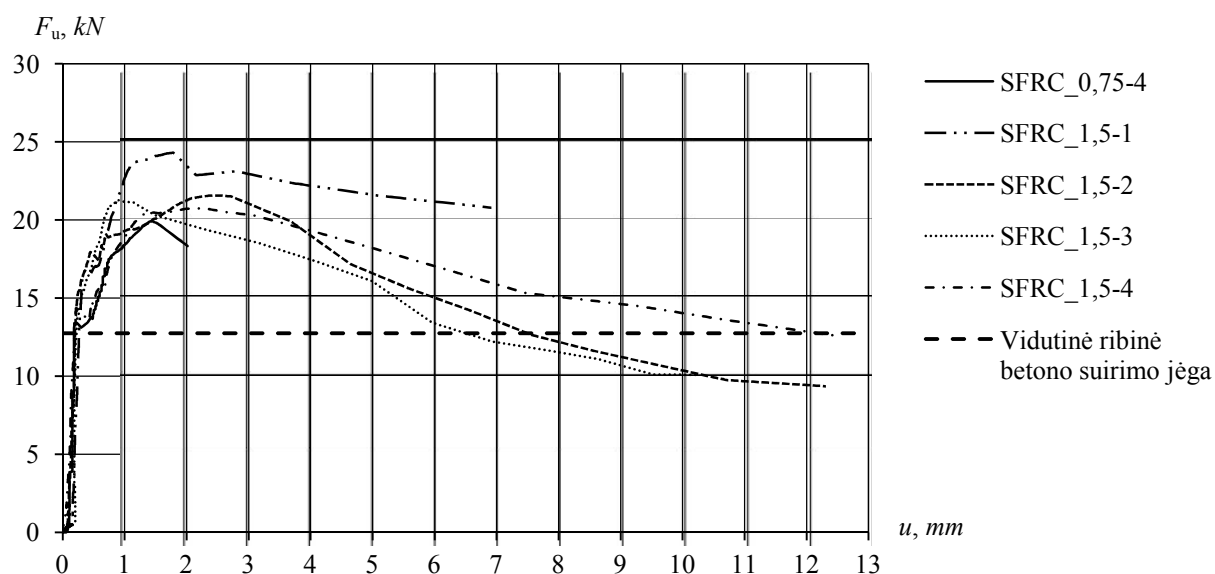
čia F_u – ribinė apkrova;

l – atstumas tarp atramų;

b – prizmės plotis;

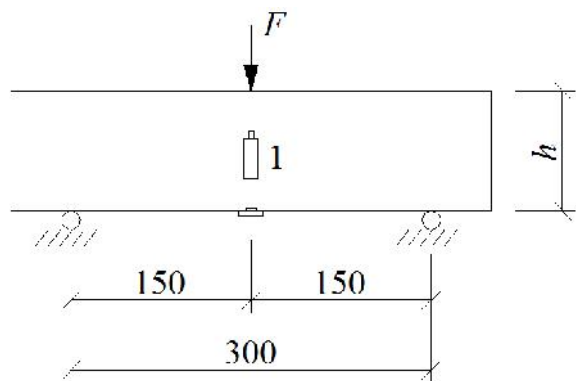
h – prizmės aukštis.

Kaip rodo 4.3 lentelė bei 4.2 pav. pateiktos bandinių apkrovų ir įlinkių kreivės, fibrų kiekį padidinus nuo 0,75 % iki 1,5 %, lenkimo stipris padidėjo vidutiniškai 10 %, suirimas tapo plastiškesnis, o ribinis įlinkis padidėjo 3,4-6,4 karto.



4.2 pav. Lenkiamų bandinių apkrovų ir įlinkių kreivės

a)



b)



4.3 pav. Eksperimentinis bandinių lenkimo stiprio nustatymas; a – bandymo ir prietaisų išdėstymo schema (1 – įlinkiamatis); b – eksperimento eiga

Iš bandymo rezultatų matyti, kad fibros ženkliai padidina atlaikomą jėgą. Atlaikoma jėga, palyginus su kontroline serija, padidėja vidutiniškai 1,58 ir 1,72 karto, kai fibrų kiekis yra atitinkamai 0,75 % ir 1,5 %. 4.4 pav. parodytas bandinių be fibrų (a) ir su fibromis (b) suirimo pobūdis. Bandiniai be fibrų suiro iškart po pirmojo plyšio susidarymo, kuris padalino bandinius į dvi atskiras dalis. Bandinių, armuotų plieninėmis fibromis, suirimas yra plastiškas. Atsiradus pirmiesiems plyšiams fibros suvaržo pleišėjimą ir atlaiko normalinius įtempius, todėl suirimas panašus į mažai armuoto gelžbetoninio elemento. Fibromis armuotuose bandiniuose, skirtingai nei paprasto betono, be pagrindinio normalinio plyšio atsiranda ir kitų, smulkesnių plyšių. Taip pat pastebima, kad bandiniai su didesniu kiekiu fibrų pradeda pleišėti esant vidutiniškai 13,7 % didesnei apkrovai.

a)



b)



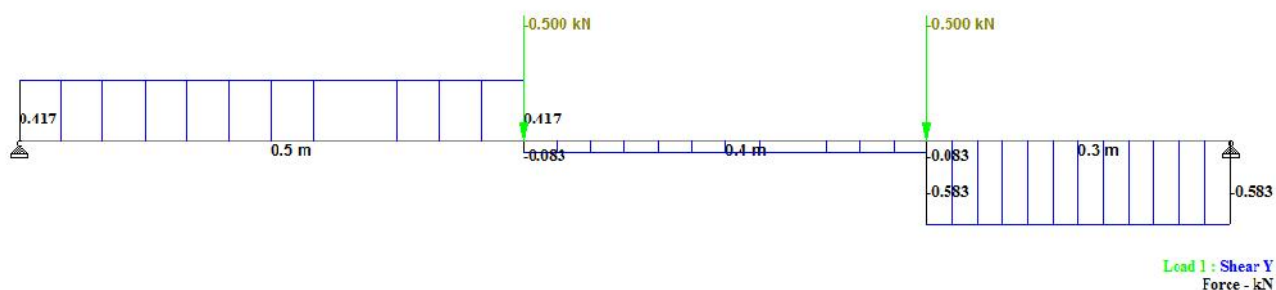
4.4 pav. Lenkiamų bandinių suirimo pobūdis, kai betonas be fibrų (a) ir su fibromis (b)

3.3. Gelžbetoninių sijų, armuotų plieninėmis fibromis, eksperimentinis tyrimas

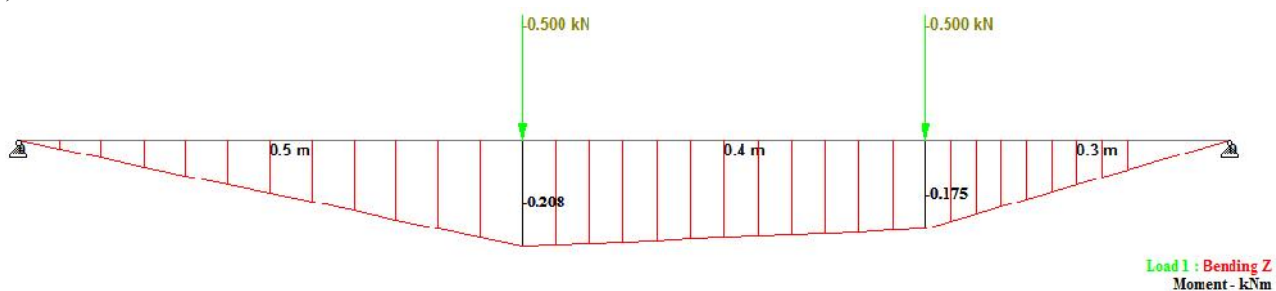
Pagrindinis eksperimentinio tyrimo tikslas yra ištirti plieninių fibrų įtaką skersinės jėgos veikiamų sijų suirimo charakteriui, įtempių ir deformacijų būviui, bei rezultatus panaudoti teorinių modelių palyginimui.

Eksperimentinėje dalyje buvo bandomos trys serijos sijų po du bandinius. Visų sijų matmenys identiški: ilgis 1,5 m, aukštis 0,2 m, plotis 0,1 m. Atstumas tarp atramų yra $l = 1,2$ m, o tarp apkrovų – $l/3 = 0,4$ m. Vienintelis kintamas dydis – fibrų kiekis ($V_f = 0\%$, $V_f = 0,75\%$ ir $V_f = 1,5\%$). Siekiant sutaupyti tenzometrinių jutiklių, jėga buvo paslinkta 10 cm nuo vidurio atramos link, taip suteikiant 1,4 karto didesnę skersinę jėgą dešiniajame krašte (4.5 pav.).

a)



b)



4.5 pav. Sijos skersinės jėgos (a) ir lenkimo momento (b) pasiskirstymo diagramos

Išilginės tempiamos armatūros kiekis turi būti toks, kad suirimas įvyktų dėl skersinės jėgos (įstrižajame pjūvyje), todėl reikia parinkti tokį armatūros kiekį, kad suirimą įstrižajame pjūvyje sukelti jėga F_V būtų mažesnė nei suirimą normaliniame pjūvyje sukelti jėga F_M . Pasirinkta sijų tempiamą zoną armuoti dviem Ø10 S400 klasės armatūros strypais.

Statmenojo sijos pjūvio laikomoji galia pagal EC-2 metodiką bus:

$$M_{Rds} = \eta \cdot f_{ck} \cdot x_{eff} \cdot b(d - 0,5x_{eff}) = 1,0 \cdot 20,0 \cdot 10^3 \cdot 0,0314 \cdot 0,1(0,175 - 0,5 \cdot 0,0314) = 10,0 \text{ kNm},$$

čia $\eta = 1,0$, kai $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ – gniuždymo įtempių redukavimo koeficientas;

$b = 0,100 \text{ m}$ – sijos plotis;

$f_{ck} = 20MPa$ – gniuždomojo betono charakteristinis stipris (prognozuojama betono klasė – C20/25);

Gniuždomosios zonos aukštis apskaičiuojamas taip:

$$x_{eff} = \frac{f_{yk} \cdot A_{s1}}{\eta \cdot f_{ck} \cdot b} = \frac{400 \cdot 0,000157}{1,0 \cdot 20 \cdot 0,1} = 0,0314m,$$

čia $f_{yk} = 400MPa$ – tempiamosios S400 klasės armatūros charakteristinis stipris;

$A_s = 0,000157m^2$ – tempiamosios išilginės armatūros plotas.

Betono santykinis gniuždomosios zonos aukštis:

$$\xi = \frac{x_{eff}}{\lambda \cdot d} = \frac{0,0314}{0,8 \cdot 0,175} = 0,224 < \xi_{lim} = 0,609,$$

čia $\lambda = 0,8$ – gniuždomosios zonos aukščio redukavimo koeficientas;

$d = 0,175m$ – sijos naudingasis aukštis.

Maksimalus lenkimo momentas yra $0,5 m$ atstumu nuo kairiosios atramos ir yra lygus $0,208F$ (4.5 pav., b). Tada maksimali atlaikoma jėga, sukelianti suirimą normaliniame pjūvyje:

$$F_M = \frac{M_{Rds}}{0,208} = \frac{10,0}{0,208} = 48,1kN.$$

Sijos be skersinės armatūros įstrižojo pjūvio laikomoji galia pagal EC-2 metodiką apskaičiuojama taip:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k(100\rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] b \cdot d = \left[0,18 \cdot 2,0(100 \cdot 0,00897 \cdot 20)^{\frac{1}{3}} \right] 0,1 \cdot 0,175 =$$

$$= 0,01649MN = 16,49kN,$$

bet ne mažiau kaip

$$V_{Rd,c} = v_{min} \cdot b \cdot d = 256 \cdot 0,1 \cdot 0,175 = 4,48kN,$$

$$\text{čia } k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{175}} = 2,07 > 2, \text{ imama } k = 2;$$

$$\rho_l = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{0,000157}{0,1 \cdot 0,175} = 0,00897 < 0,02 \text{ – armavimo tempiamąją armatūrą koeficientas;}$$

$$C_{Rd,c} = 0,18;$$

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0,035 \cdot 2,0^{\frac{3}{2}} \cdot 20^{\frac{1}{2}} = 0,256.$$

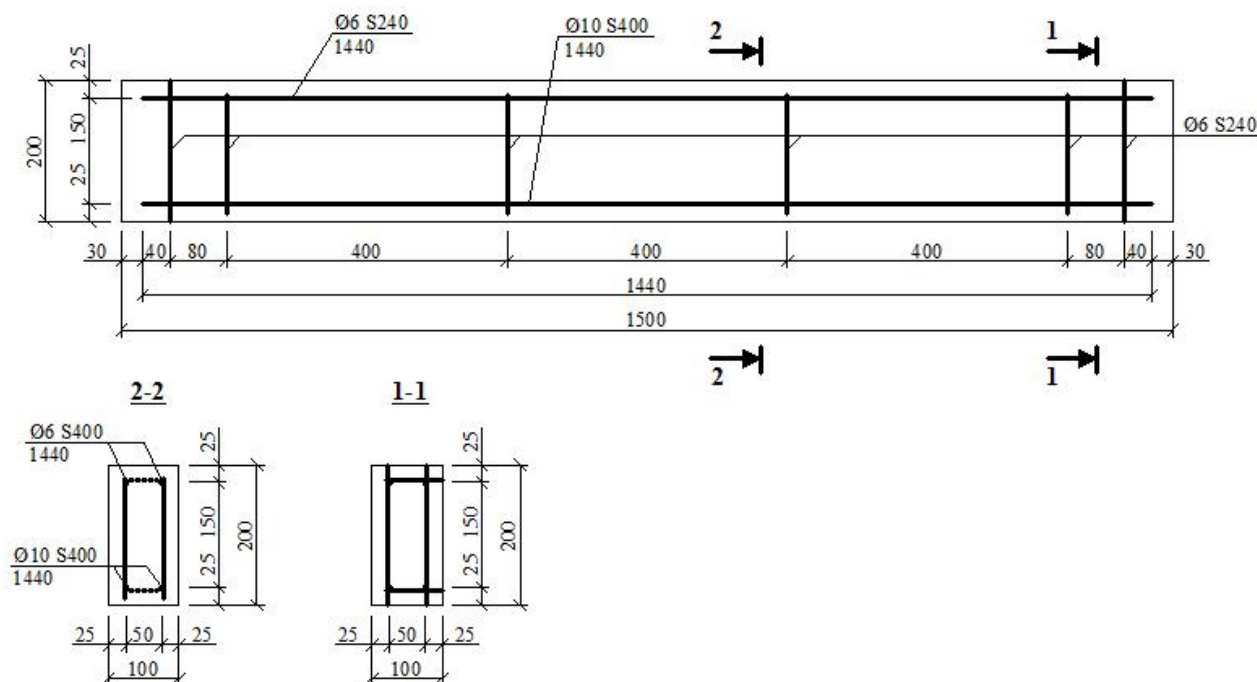
Maksimali skersinė jėga yra $0,3 m$ atstumu nuo dešinėsios atramos ir yra lygi $0,583F$ (4.5 pav., a). Tada maksimali atlaikoma jėga, sukelianti suirimą įstrižajame pjūvyje:

$$F_V = \frac{V_{Rd,c}}{0,583} = \frac{16,49}{0,583} = 28,3kN.$$

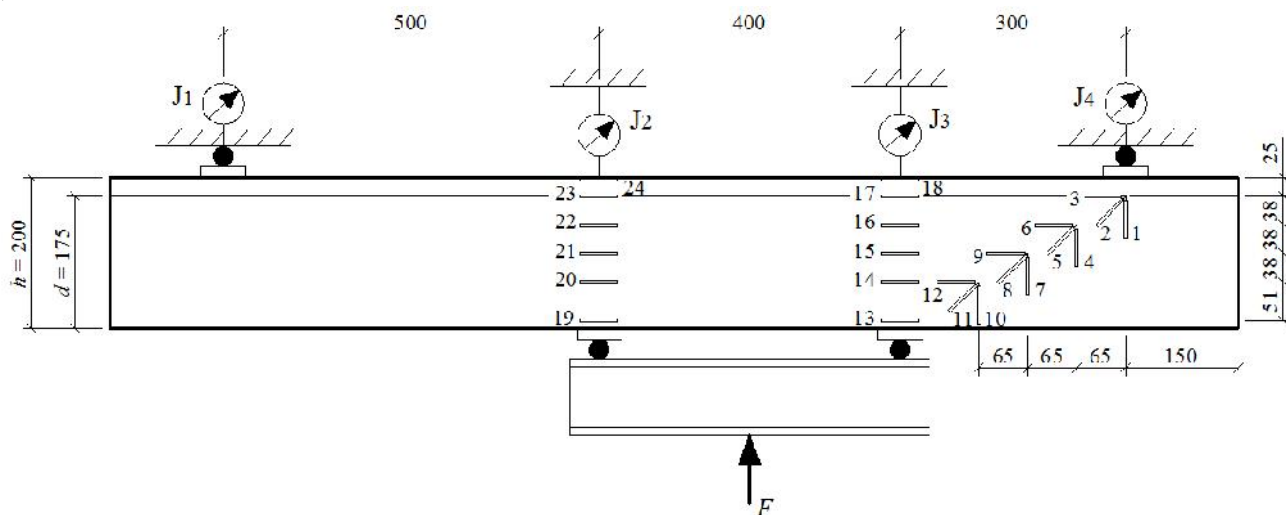
Kadangi $F_V = 28,3kN < F_M = 48,1kN$, tai suirimas įvyks įstrižajame pjūvyje.

Galutinai priimama sijas armuoti virintiniais strypynais, kurių tempiami strypai yra $\varnothing 10S400$, o konstrukcinė skersinė armatūra ir gniuždomi strypai – $\varnothing 6S240$. Sijų armavimo schema parodyta 4.6 pav. a.

a)



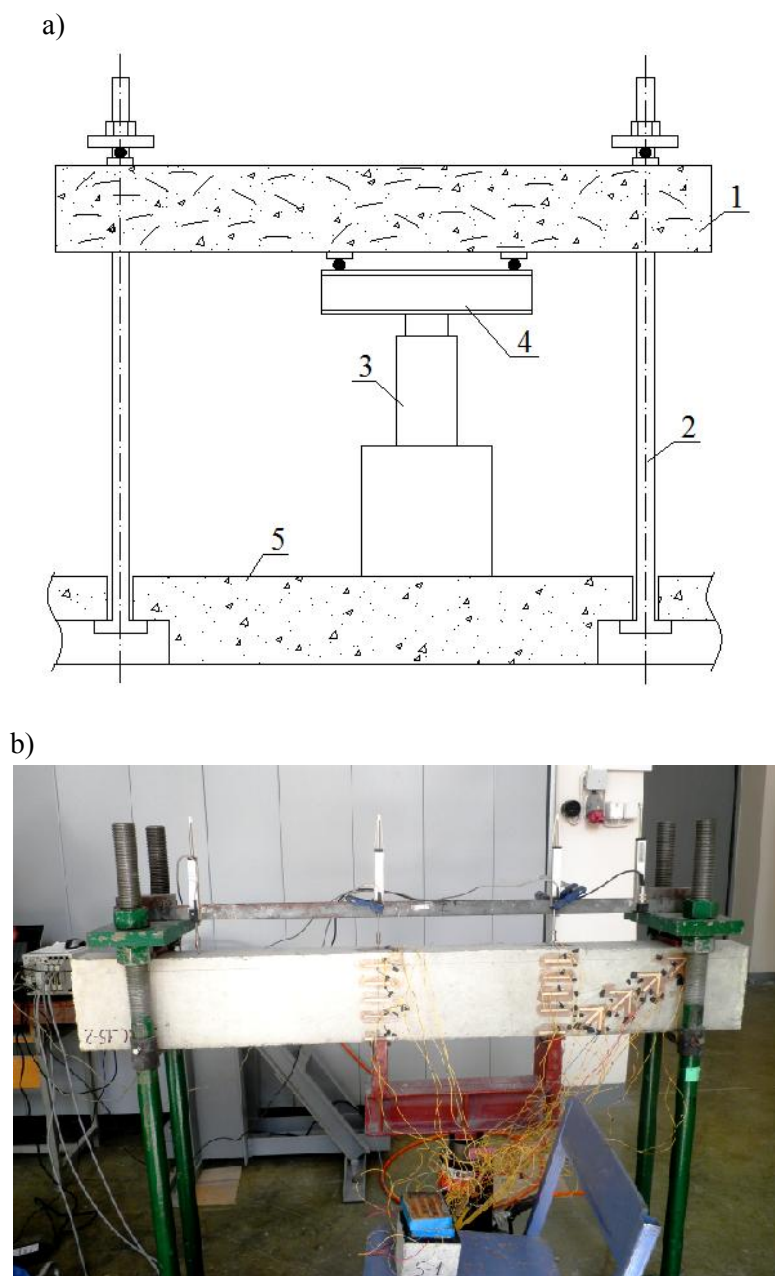
b)



4.6 pav. Lenkiamų sijų armavimas (a) ir badymo ir prietaisų išdėstymo schema (b); J_1 - J_4 yra įlinkomačiai; 1-24 yra tenzodavikliai; F – jėgos pridėjimo vieta

Eksperimento metu buvo matuojamas įlinkis ties jėgų pridėjimo vietomis, įvertinant atramų sėdimą (4.6 pav. b). Siekiant nustatyti neutraliosios ašies padėtį tenzometriniais jutikliais buvo matuojamos deformacijos ties 3-čiu įlinkomačiu (13-18 davikliai). Sijose SFRC_0,75-2, SFRC_1,5-1 ir SFRC_1,5-2 buvo priklijuoti papildomi tenzometriniai jutikliai neutraliosios ašies

nustatymui ties 2-u įlinkomačiu (19-24 davikliai). Svarbiausiųjų įtempių krypties kampo nustatymui įstrižajame pjūvyje keturiose vietose klijuojama po tris tenzometrinius jutiklius, kurie sudaro vadinamąją „vištos pėdą“ (tenzometriniai jutikliai klijuojami dviem statmenomis kryptimis ir viena įstriža kryptimi, kuri sudaro 45° kampą su pirmosiomis dviem). Apkrova buvo suteikiama hidrauliniu domkratu, o įlinkomačių bei tenzometrinių jutiklių duomenys įrašomi kompiuterizuotai, vidutiniškai kas 0,3 sekundės. Jutiklių išdėstymas bei bandymo schema ir eiga parodyta 4.6 pav., b ir 4.7 pav., a, b.



4.7 pav. a) Sijos bandymo schema: 1 – bandoma sija; 2 – plieninės templės; 3 – hidraulinis domkratas; 4 – skersinė sija; 5 – jėgos grindys; b) Sijos bandymo eiga

Bandymo rezultatai pateikti 4.4 lentelėje, o apkrovų ir įlinkių kreivės, priklausomai nuo fibrų kiekio V_f , pateiktos 4.8 pav. Išanalizavus 4.8 pav., a, b ir 4.4 lentelės duomenis matyti, kad fibros ženkliai padidina atlaikomą jėgą, o suirimą iš trapios pakeičia į plastišką. Sijų, armuotų 0,75 % fibrų, atlaikoma jėga padidėjo vidutiniškai 1,39 karto, lyginant su sijomis be fibrų. Sijų, armuotų 1,5 % fibrų, atlaikomos jėgos padidėjimas yra panašus, vidutiniškai 1,43 karto, tačiau pastebimas ženklus pleišėjimo jėgos padidėjimas (F_{crc} reikšmė SFRC_1,5 serijoje yra vidutiniškai 1,34 karto didesnė nei SFRC_0,75 serijoje). Nežymų atlaikomos jėgos padidėjimą SFRC_1,5 serijoje lemia sijų suirimo pobūdžio pasikeitimas. Sijos be fibrų suiro įstrižajame pjūvyje, tuo tarpu fibromis armuotos sijos suiro normaliniame pjūvyje, pradėjus tekėti išilginei armatūrai. Įstrižojo pjūvio stiprumas fibrobetonio sijose išnaudojamas nevysiškai. Tai reiškia, kad plieninės fibros gali visiškai atstoti skersinę armatūrą.

4.4 lentelė. Eksperimentinių sijų duomenys ir bandymo rezultatai

Bandinio pav.	V_f , %	a/d	ρ , %	$f_{cube,vid}$, MPa	F_{crc} , kN	F_u	$\frac{E_{eff,i}I_{eff,i}}{E_{eff,C-1}I_{eff,C-1}}$	Suirimo pobūdis*
C-1	0	1,71	0,897	30,85	18	70,7	1,0	V
C-2**	0	1,71	0,897		18	-	1,0	V
SFRC_0,75-1	0,75	1,71	0,897	37,47	20	95,8	1,10	M
SFRC_0,75-2	0,75	1,71	0,897		18	101,3	1,15	M
SFRC_1,5-1	1,5	1,71	0,897	38,43	28	98,0	1,22	M
SFRC_1,5-2	1,5	1,71	0,897		23	104,2	1,29	M

Pastabos: (1) V_f – fibrų kiekis; F_{crc} – pleišėjimo jėga; F_u – ribinė jėga; $\frac{E_{eff,i}I_{eff,i}}{E_{eff,C-1}I_{eff,C-1}}$ – i -tosios sijos

ir sijos C-1 lenkiamojo standžio santykis (nustatytas pagal 4.8 pav. a);

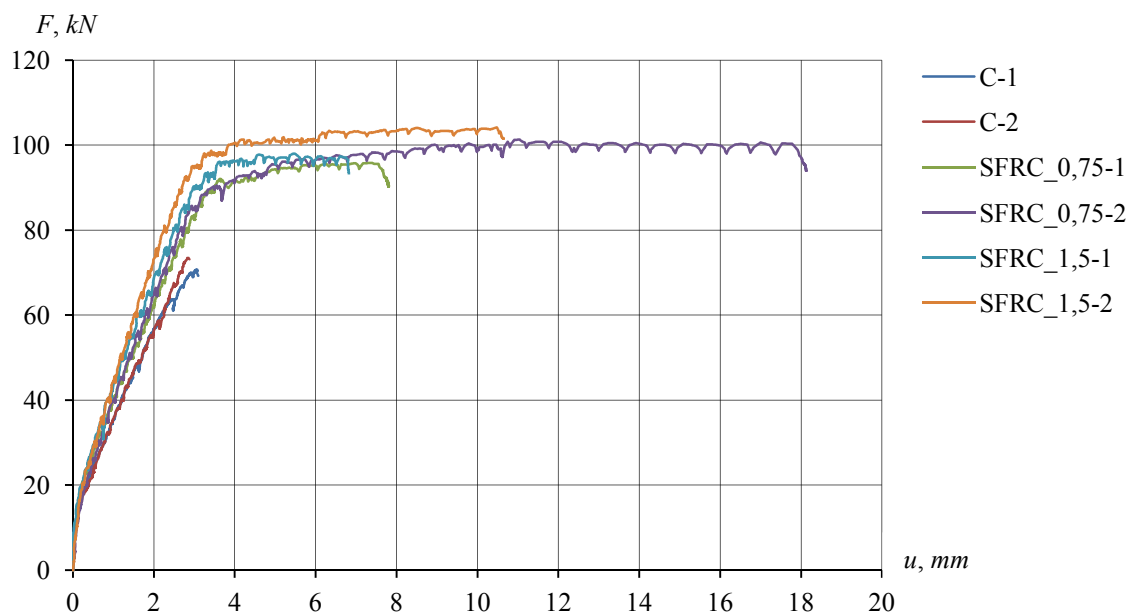
(2)* V – suirimas įstrižajame pjūvyje; M – suirimas normaliniame pjūvyje;

(3)** Sija suiro kitoje, nenumatytoje suirimo zonoje.

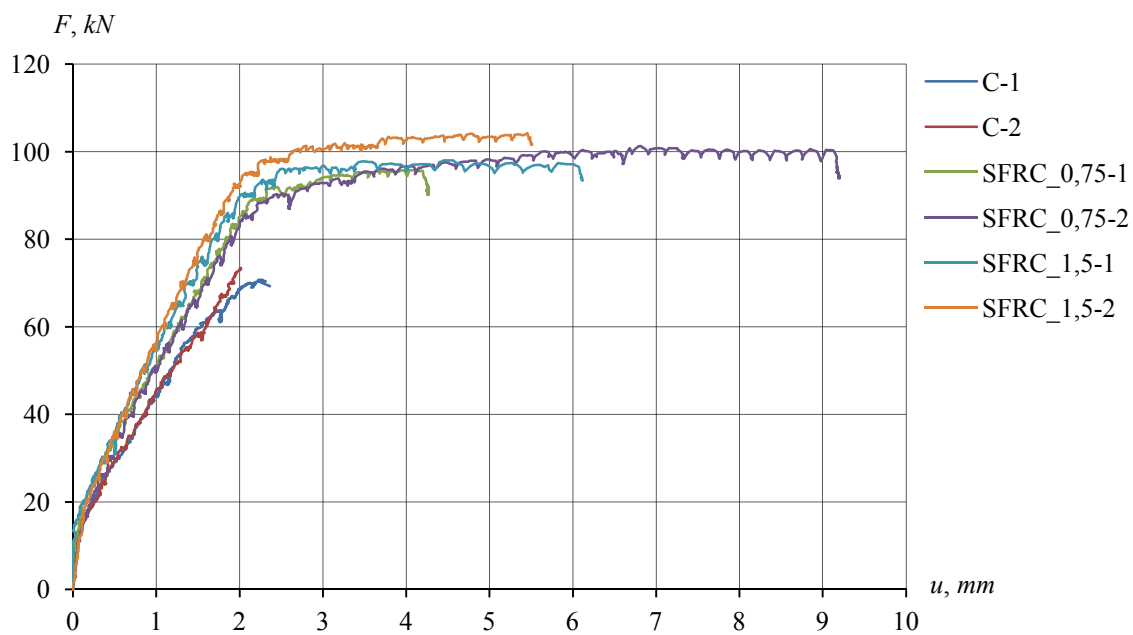
4.4 lentelėje ir 4.8 pav. pateikti rezultatai rodo, kad fibros padidina ne tik atlaikomą jėgą, bet ir lenkiamąjį standumą. Standumas SFRC_0,75 ir SFRC_1,5 serijose yra vidutiniškai 1,13 ir 1,26 karto didesnis nei C serijoje.

Kaip matyti iš teorinių skaičiavimų (40 psl.), teorinė įstrižojo pjūvio suirimo jėga yra $48,1 / 28,3 = 1,70$ karto mažesnė nei suirimo jėga normaliniame pjūvyje, tačiau įdėjus tik 0,75 % fibrų, suirimas įvyko normaliniame pjūvyje.

a)



b)

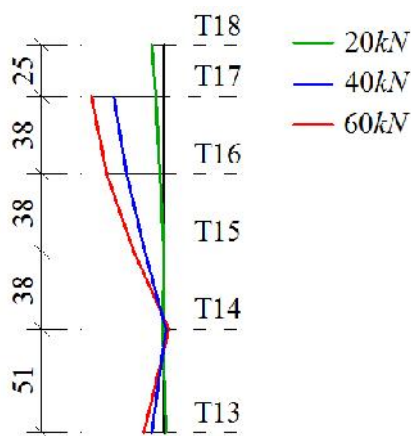


4.8 pav. Apkrovų ir įlinkių kreivės (a – ties 2-u įlinkomačiu; b – ties 3-iu įlinkomačiu)

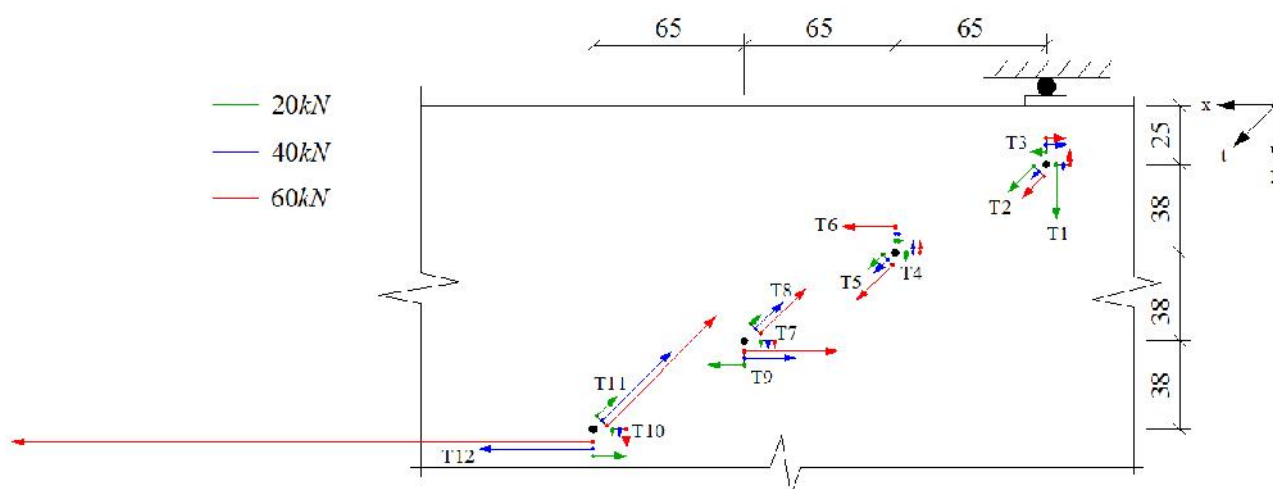
3.3.1. Sijos C-1 deformacijos ir suirimo pobūdis

Sijos C-1 plyšių struktūra parodyta 4.11 pav. Sijos pleišėjimo jėga F_{cre} yra 18 kN. Pirmieji aiškiai pastebimi normaliniai plyšiai susidarė sijos viršuje, esant 42-44 kN jėgai, tačiau tolimesnis jų vystymasis iki 61 kN jėgos nepastebėtas. Kai jėga pasiekė 47 kN, pradėjo formuotis pirmieji įstrižieji plyšiai. Pagrindinis įstrižasis plyšys susidarė netoli dešinėsios atramos, esant 61 kN jėgai. Toliau didėjant jėgai šis plyšys išplito nuo atramos iki jėgos pridėjimo vietos, taip sukeldamas trapų sijos suirimą įstrižajame pjūvyje. Šios sijos suirimo jėga buvo 70,7 kN, t.y. 1,16 karto didesnė nei pirmo įstrižojo plyšio dešinėje pusėje susidarymo jėga.

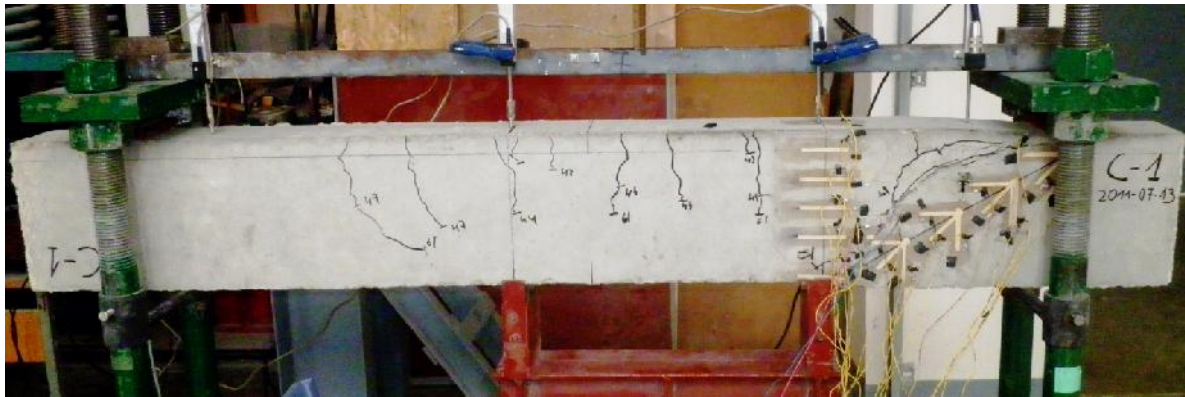
Deformacijų ties dešiniąja apkrova pasiskirstymas pagal aukštį parodytas 4.9 pav, o T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos parodytos 4.10 pav. Iš grafikų matyti, kad beveik visas skerspjūvis ties dešiniąja apkrova yra gniuždomas. Didžiausios gniuždymo deformacijos ties dešiniąja apkrova esant 60 kN jėgai užfiksuotos T17 tenzometriniam jutiklyje (apytiksliai 0,0036), o didžiausios tempimo deformacijos – ties tenzometrinio jutiklio T14 (apytiksliai 0,00026). Reikia pažymėti, kad ženkliai T12 tenzometrinio jutiklio deformacijų padidėjimui esant 60 kN jėgai įtakos turėjo tai, kad jėgą padidinus iki ≈ 60 kN, jutiklį pasiekė pagrindinis įstrižasis plyšys.



4.9 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje C-1 esant skirtingoms apkrovoms; T13-18 yra tenzometriniai jutikliai



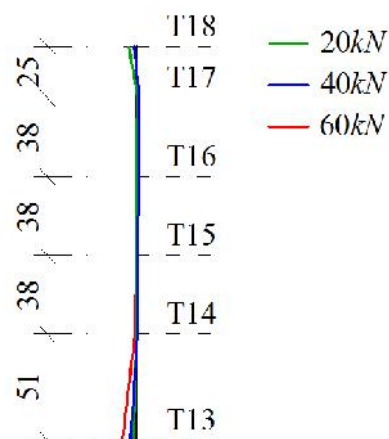
4.10 pav. T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos sijoje C-1 esant skirtingoms apkrovoms



4.11 pav. Sijos C-1 suirimo pobūdis

3.3.2. Sijos C-2 deformacijos ir suirimo pobūdis

Sija C-2 suiro kitoje, nenumatytoje suirimo zonoje. Taip atsitiko dėl pagalbinės konstrukcinės skersinės armatūros patekimo į tiriamo įstrižo pjūvio zoną. Todėl rezultatai yra neanalizuojami, o paprasčiausiai pateikti 4.12-4.13 pav.



4.12 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje C-2 esant skirtingoms apkrovoms; T13-18 yra tenzometriniai jutikliai

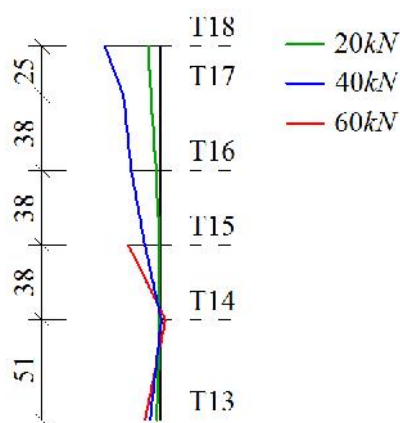


4.13 pav. Sijos C-2 suirimo pobūdis

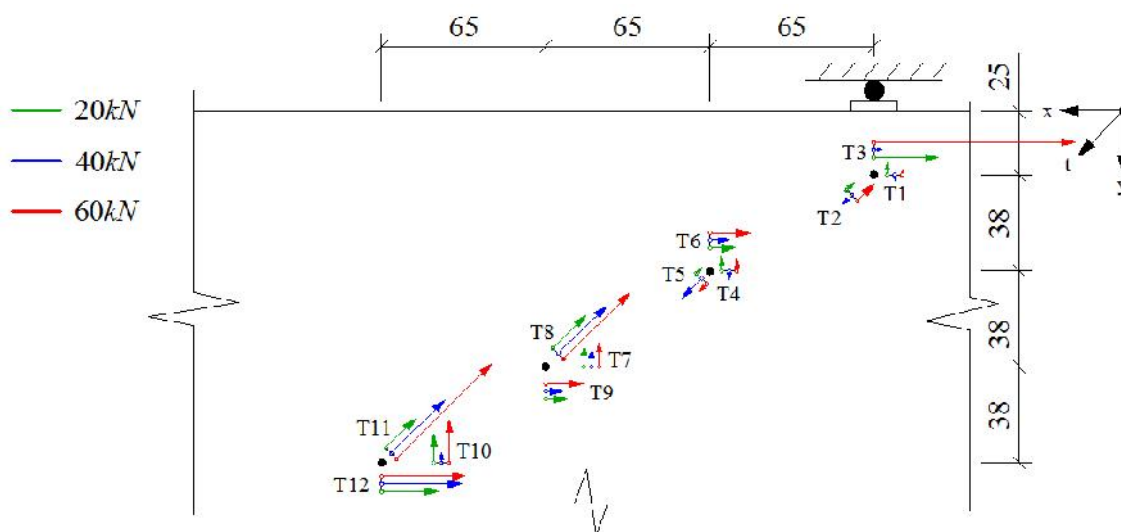
3.3.3. Sijos SFRC_0,75-1 deformacijos ir suirimo pobūdis

Sijos SFRC_0,75-1 plyšių struktūra parodyta 4.16 pav. Sijos pleišėjimo jėga F_{cre} yra 20 kN. Pasiekus 44 kN jėgą atsiranda pirmasis įstrižasis plyšys ties dešiniąja atrama. Toliau didėjant jėgai formuojasi vis nauji įstrižieji plyšiai ties abiejomis atramomis, kol pasiekus 70 kN jėgą susidaro magistralinis įstrižasis plyšys ties dešiniąją atrama. Šioje stadijoje gniuždomoji zona ties atrama akivaizdžiai didesnė. Visgi jėgai pakilus iki 83 kN pradėjo greitai didėti normalinis plyšys ties kairiąja apkrova. Esant ≈ 95 kN jėgai šį plyšį kertanti išilginė armatūra pradeda tekėti ir įvyksta plastiškas sijos suirimas normaliniame pjūvyje. Šios sijos suirimo jėga buvo 2,18 karto didesnė nei pirmo įstrižojo plyšio dešinėje pusėje susidarymo jėga.

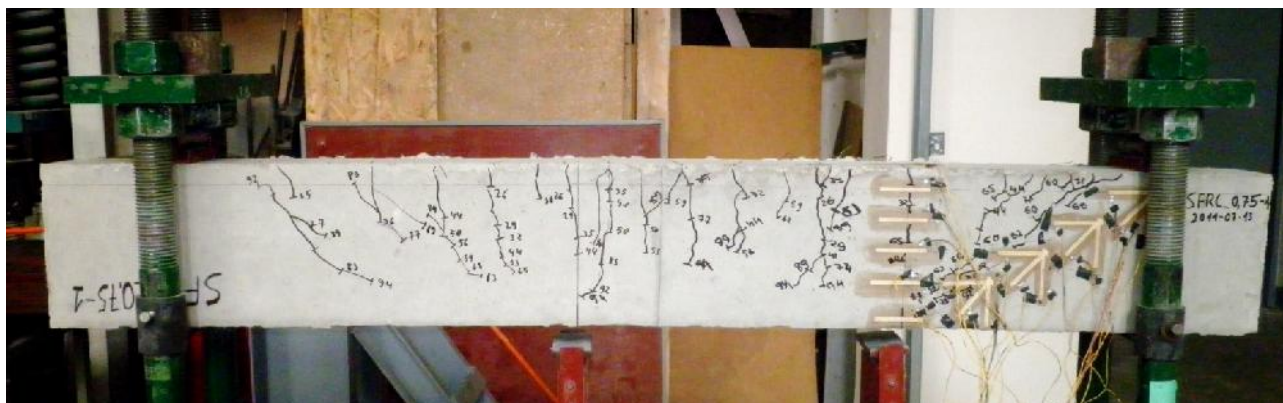
Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje SFRC_0,75-1 ties dešiniąja apkrova parodytas 4.14 pav, o T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos – 4.15 pav. Iš grafikų matyti, kad beveik visas skerspjuvis ties dešiniąja apkrova, kaip ir C-1 sijos, yra gniuždomas. Didžiausios gniuždymo deformacijos ties dešiniąja apkrova esant 40 kN jėgai užfiksuotos T18 tenzometriniam jutiklyje (apytiksliai 0,0028), o didžiausios tempimo deformacijos – ties tenzometrinio jutiklio T14 (apytiksliai 0,0000105). Apkrovai pasiekus ≈ 45 kN ties T16-18 tenzometriniais jutikliais išplito normalinis plyšys ir šių jutiklių deformacijos nebebuvo fiksuojamos.



4.14 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje SFRC_0,75-1 esant skirtingoms apkrovoms; T13-18 yra tenzometriniai jutikliai



4.15 pav. T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos sijoje SFRC_0,75-1 esant skirtingoms apkrovoms



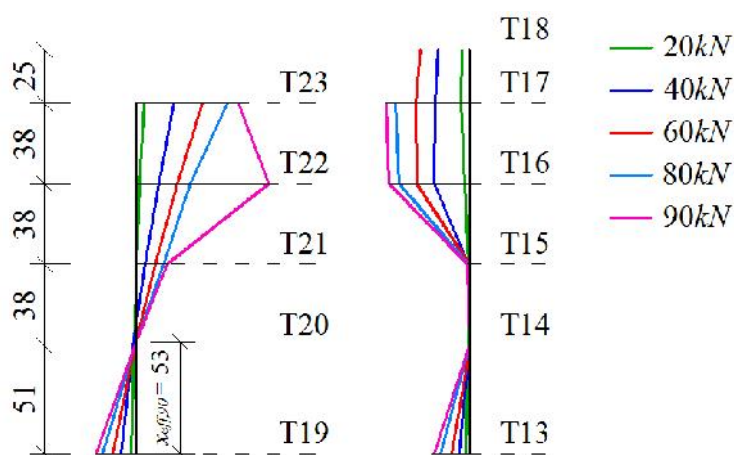
4.16 pav. Sijos SFRC_0,75-1 suirimo pobūdis

3.3.4. Sijos SFRC_0,75-2 deformacijos ir suirimo pobūdis

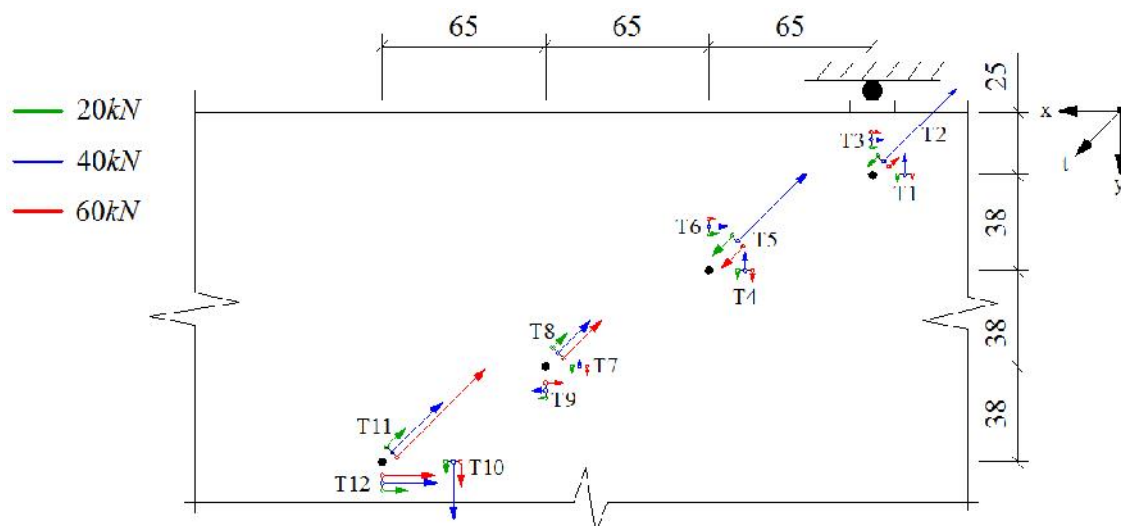
Sijos SFRC_0,75-2 plyšių struktūra parodyta 4.19 pav. Sijos pleišėjimo jėga F_{cr} yra 18 kN. Normalinių plyšių plitimas skiriasi nuo C-1 sijos: didinant jėgą normaliniai plyšiai šakojasi įvairiomis kryptimis, jungiasi. Pirmasis įstrižasis plyšys pastebėtas esant 45 kN jėgai. Ši sija, kaip ir SFRC_0,75-1, suiro normaliniame pjūvyje, pradėjus tekėti išilginei armatūrai. Pagrindinis normalinis plyšys susidarė didžiausio lenkimo momento vietoje, ties kairiąja apkrova. Tekant armatūrai ties šiuo plyšiu buvo suardyta gniuždomoji zona ir susidarė plastinis šarnyras. SFRC_0,75-2 sijos suirimo jėga buvo 2,25 karto didesnė nei pirmo įstrižojo plyšio dešinėje pusėje susidarymo jėga.

Deformacijų pasiskirstymas ties apkrovomis sijoje SFRC_0,75-2 parodytas 4.17 pav, o T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos – 4.18 pav. Iš grafikų matyti, kad beveik visas skerspjuvis ties dešiniąja apkrova yra gniuždomas, o ties T14 ir T15 tenzometriniais jutikliais deformacijos artimos nuliui. Didžiausios gniuždymo deformacijos ties dešiniąja apkrova esant 60 kN jėgai užfiksuotos T17 tenzometriniam jutiklyje (apytiksliai 0,0025), o didžiausios tempimo deformacijos – ties tenzometrinio jutiklio T14 (apytiksliai 0,000501).

Deformacijų pasiskirstymo T19-T23 jutikliuose grafikas (4.17 pav.) rodo, kad gniuždomosios zonos aukštis ties kairiąja apkrova esant 90 kN jėgai yra 53 mm.



4.17 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje SFRC_0,75-2 esant skirtingoms apkrovoms; T13-T23 yra tenzometriniai jutikliai; $x_{eff,90}$ – gniuždomosios zonos aukštis esant 90 kN jėgai



4.18 pav. T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos sijoje SFRC_0,75-2 esant skirtingoms apkrovoms



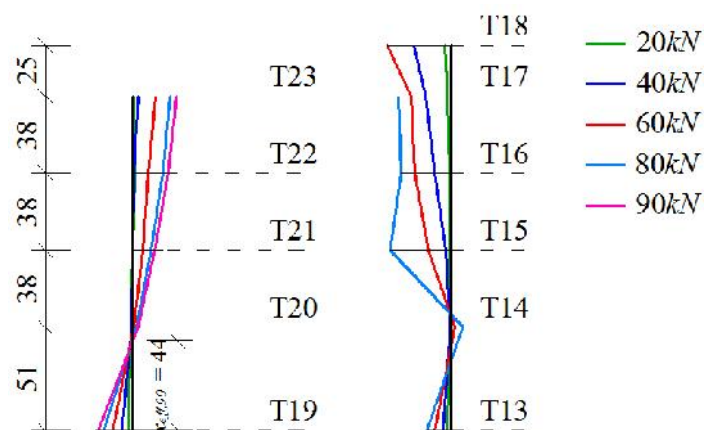
4.19 pav. Sijos SFRC_0,75-2 suirimo pobūdis

3.3.5. Sijos SFRC_1,5-1 deformacijos ir suirimo pobūdis

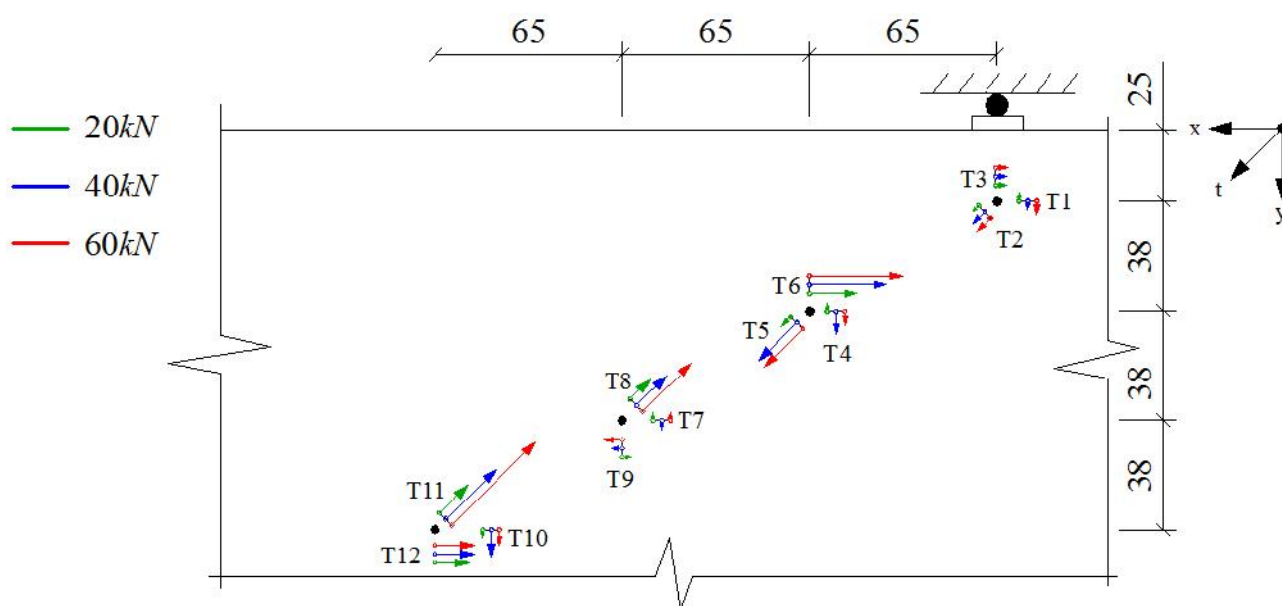
Sijos SFRC_1,5-1 plyšių struktūra parodyta 4.22 pav. Ši sija pradėjo pleišėti žymiai vėliau nei kitų serijų sijos, esant 28 kN jėgai. Taip pat pastebima ir vėlesnė įstrižųjų plyšių formavimosi pradžia (pirmas įstrižasis plyšys susidarė pasiekus 60 kN jėgą). Toliau didinant apkrovą įstrižieji plyšiai palaipsniui didėja, tačiau vos jiems pasiekus apie 2/3 sijos aukščio, įvyksta suirimas normaliniame pjūvyje, ties dešiniąja apkrova. Tai rodo, kad 1,5 % fibrų efektyviai padidina įstrižųjų plyšių susidarymo jėgą ir pristabdo šių plyšių plitimą. Šios sijos suirimo jėga buvo 1,63 karto didesnė nei pirmo įstrižojo plyšio dešinėje pusėje susidarymo jėga.

Deformacijų pasiskirstymas ties apkrovomis sijoje SFRC_1,5-1 parodytas 4.20 pav, o T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos – 4.21 pav. Didžiausios gniuždymo deformacijos ties dešiniąja apkrova esant 60 kN jėgai užfiksuotos T18 tenzometriniame jutiklyje (apytiksliai 0,0032), o didžiausios tempimo deformacijos – ties tenzometrinio jutiklio T14 (apytiksliai 0,00019).

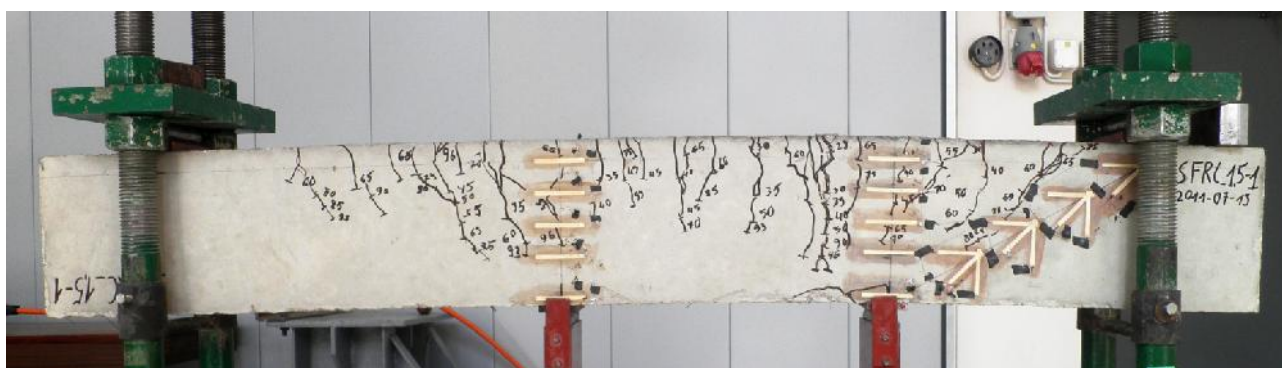
Deformacijų pasiskirstymo T19-T23 jutikliuose grafikas rodo (4.20 pav.), kad gniuždomosios zonos aukštis ties kairiąja apkrova esant 90 kN jėgai yra 44 mm.



4.20 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje SFRC_1,5-1 esant skirtingoms apkrovoms; T13-T23 yra tenzometriniai jutikliai; $x_{eff,90}$ – gniuždomosios zonos aukštis esant 90 kN jėgai



4.21 pav. T1-T12 tenzometriniai jutikliai deformacijos sijoje SFRC_1,5-1 esant skirtingoms apkrovoms



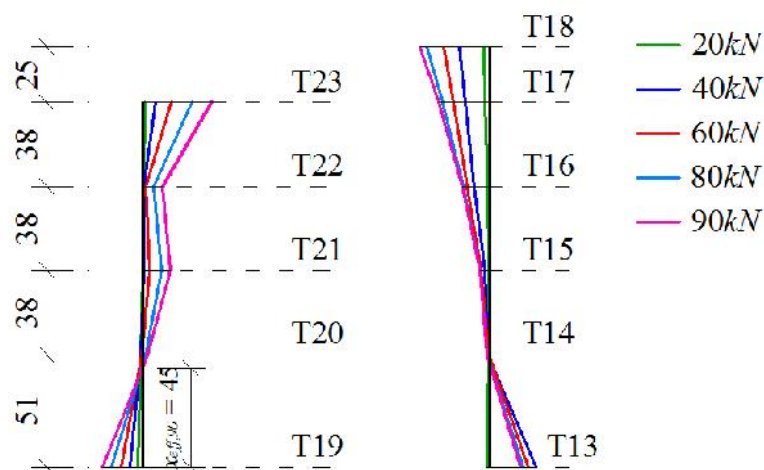
4.22 pav. Sijos SFRC_1,5-1 suirimo pobūdis

3.3.6. Sijos SFRC_1,5-2 deformacijos ir suirimo pobūdis

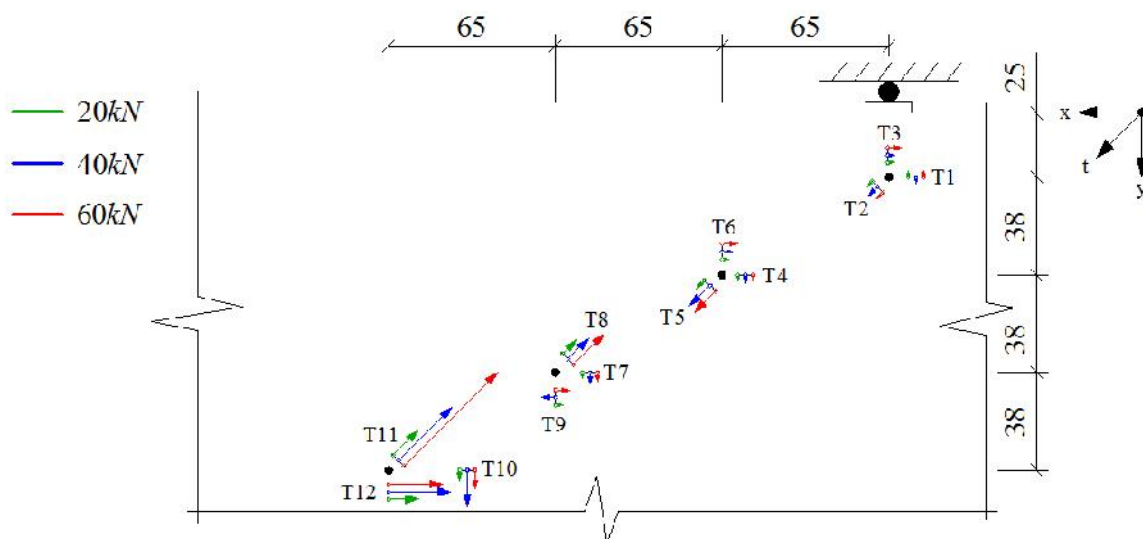
Sijos SFRC_1,5-2 plyšių struktūra parodyta 4.25 pav. Ši sija pradėjo pleišėti esant 23 kN jėgai. Normaliniai plyšiai pirmiausia susidarė ties sijos viduriu. Toliau didėjant apkrovai normaliniai plyšiai išplito link atramų. Intensyviausiai sija pleišėjo ties kairiąja apkrova, didžiausio lenkimo momento zonoje. Pirmų įstrižųjų plyšių susidarymo jėga – 55 kN. Tačiau kaip ir SFRC_1,5-1 sijoje, įstrižieji plyšiai didinant apkrovą plinta lėčiau nei SFRC_0,75 ir C serijų siose, o suirimas tampa panašus į skersinę armatūrą armuotos sijos. Šios sijos suirimo jėga buvo 1,89 karto didesnė nei pirmo įstrižojo plyšio dešinėje pusėje susidarymo jėga.

Deformacijų pasiskirstymas ties apkrovomis sijoje SFRC_1,5-2 parodytas 4.23 pav, o T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos – 4.24 pav. Didžiausios gniuždymo deformacijos ties dešiniąja apkrova esant 60 kN jėgai užfiksuotos T18 tenzometriniame jutiklyje (apytiksliai 0,0021), o didžiausios tempimo deformacijos – ties tenzometrinio jutiklio T13 (apytiksliai 0,0018).

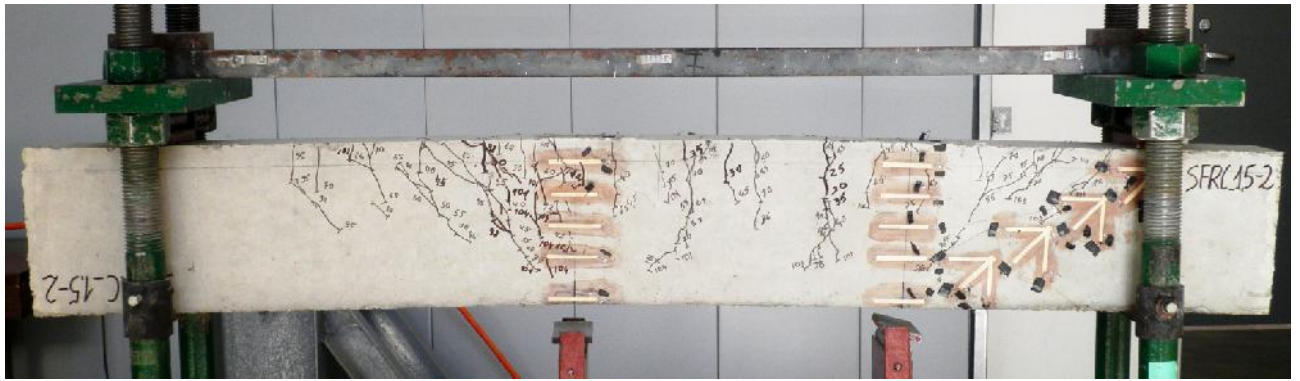
Deformacijų pasiskirstymo T19-T23 jutikliuose grafikas (4.23 pav.) rodo, kad gniuždomosios zonos aukštis ties kairiąja apkrova esant 90 kN jėgai yra 45 mm.



4.23 pav. Deformacijų pasiskirstymas pagal aukštį sijoje SFRC_1,5-2 esant skirtingoms apkrovoms. T13-T23 yra tenzometriniai jutikliai; $x_{eff,90}$ – gniuždomosios zonos aukštis esant 90 kN jėgai



4.24 pav. T1-T12 tenzometrinių jutiklių deformacijos sijoje SFRC_1,5-2 esant skirtingoms apkrovoms



4.25 pav. Sijos SFRC_1,5-2 suirimo pobūdis

3.4. Eksperimentinių ir teorinių lenkiamos sijos įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmių palyginimas

3.4.1. Sijų įstrižojo pjūvio stiprumas pagal A. K. Sharma modelį

A.K.Sharma modelyje įstrižojo pjūvio stiprumas nepriklauso nuo fibrų kiekio, todėl C, SFRC_0,75 ir SFRC_1,5 serijose yra vienodas ir apskaičiuojamas taip:

$$v_{frc} = k f_t \left(\frac{d}{a} \right)^{0,25} = k \cdot 0,79 \cdot \sqrt{f_c} \cdot \left(\frac{d}{a} \right)^{0,25} = \frac{2}{3} \cdot 0,79 \cdot \sqrt{24,7} \cdot 0,583^{0,25} = 2,29 MPa,$$

čia $d / a = 0,175 / 0,3 = 0,583$ – naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis;

$f_c \approx 0,8 \cdot f_{cube,vid} = 0,8 \cdot 30,85 = 24,7 MPa$ – C serijos betono vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris (4.2 lentelė);

k – konstanta lygi $2/3$.

3.4.2. Sijų įstrižojo pjūvio stiprumas pagal R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho modelį

C serijos sijų teorinis įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = 2,8 \cdot \frac{d}{a} \left(0,24 \cdot f_{sp} + 80 \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} \right) + 1,70 \cdot F = 2,8 \cdot \frac{0,175}{0,3} \left(0,24 \cdot 2,24 + 80 \cdot 0,00897 \cdot \frac{0,175}{0,3} \right) + 1,70 \cdot 0 = 1,634 MPa,$$

čia $\rho = 0,897\%$ – išilginės armatūros kiekis;

f_{sp} – tempiamasis stipris skeliant, apskaičiuojamas taip:

$$f_{sp} = \frac{f_{cuf}}{20 - \sqrt{F}} + 0,7 + \sqrt{F} = \frac{30,85}{20 - \sqrt{0}} + 0,7 + \sqrt{0} = 2,24 MPa ,$$

čia $f_{cuf} = 30,85 MPa$ – C serijos betono vidutinis kubinis gniuždomasis stipris (4.2 lentelė);

$F = 0$ – fibrų faktorius, kai $V_f = 0$.

SFRC_0,75 serijos sijų teorinis įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = 2,8 \cdot \frac{d}{a} \left(0,24 \cdot f_{sp} + 80 \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} \right) + 1,70 \cdot F = 2,8 \cdot \frac{0,175}{0,3} \left(0,24 \cdot 3,31 + 80 \cdot 0,00897 \cdot \frac{0,175}{0,3} \right) + 1,70 \cdot 0,45 = 2,75 MPa,$$

čia $\rho = 0,897\%$ – išilginės armatūros kiekis;

f_{sp} – tempiamasis stipris skeliant, apskaičiuojamas taip:

$$f_{sp} = \frac{f_{cuf}}{20 - \sqrt{F}} + 0,7 + \sqrt{F} = \frac{37,47}{20 - \sqrt{0,45}} + 0,7 + \sqrt{0,45} = 3,31 MPa ,$$

čia $f_{cuf} = 37,47 MPa$ – SFRC_0,75 serijos fibrobetonio vidutinis kubinis gniuždomasis stipris (4.2 lentelė);

F – fibrų faktorius, kuris apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$F = \frac{l_f}{d_f} V_f \beta = \frac{60}{0,75} \cdot 0,0075 \cdot 0,75 = 0,45,$$

čia $l_f = 60 mm$ – fibros ilgis;

$d_f = 0,75 mm$ – fibros skersmuo;

$V_f = 0,0075$ – fibrų kiekis;

$\beta = 0,75$ – sukibimo koeficientas lenktoms fibroms.

SFRC_1,5 serijos sijų teorinis įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = 2,8 \cdot \frac{d}{a} \left(0,24 \cdot f_{sp} + 80 \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} \right) + 1,70 \cdot F = 2,8 \cdot \frac{0,175}{0,3} \left(0,24 \cdot 3,67 + 80 \cdot 0,00897 \cdot \frac{0,175}{0,3} \right) + 1,70 \cdot 0,9 = 3,65 MPa,$$

čia $\rho = 0,897\%$ – išilginės armatūros kiekis;

f_{sp} – tempiamasis stipris skeliant, apskaičiuojamas taip:

$$f_{sp} = \frac{f_{cuf}}{20 - \sqrt{F}} + 0,7 + \sqrt{F} = \frac{38,43}{20 - \sqrt{0,9}} + 0,7 + \sqrt{0,9} = 3,67 MPa ,$$

čia $f_{cuf} = 38,43 MPa$ – SFRC_1,5 serijos fibrobetonio vidutinis kubinis gniuždomasis stipris (4.2 lentelė);

F – fibrų faktorius, kuris apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$F = \frac{l_f}{d_f} V_f \beta = \frac{60}{0,75} \cdot 0,015 \cdot 0,75 = 0,9;$$

čia $l_f = 60 mm$ – fibros ilgis;

$d_f = 0,75 mm$ – fibros skersmuo;

$V_f = 0,015$ – fibrų kiekis;

$\beta = 0,75$ – sukibimo koeficientas lenktoms fibroms.

3.4.3. Sijų įstrižojo pjūvio stiprumas pagal S. A. Ashouro, G. S. Hasanaino, F. F. Wafa'o modelį

C serijos sijų teorinis įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = (0,7\sqrt{f_c} + 7F) \frac{d}{a} + 17,2\rho \frac{d}{a} = (0,7\sqrt{24,7} + 7 \cdot 0) \cdot 0,583 + 17,2 \cdot 0,00897 \cdot 0,583 = 2,12 MPa,$$

čia $F = 0$ – fibrų faktorius, kai $V_f = 0$;

$f_c \approx 0,8 \cdot f_{cube,vid} = 0,8 \cdot 30,85 = 24,7 MPa$ – C serijos betono vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris (4.2 lentelė);

$\rho = 0,897\%$ – išilginės armatūros kiekis;

$d / a = 0,175 / 0,3 = 0,583$ – naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis.

SFRC_0,75 serijos sijų teorinis įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = (0,7\sqrt{f_c} + 7F) \frac{d}{a} + 17,2\rho \frac{d}{a} = (0,7\sqrt{24,7} + 7 \cdot 0,45) \cdot 0,583 + 17,2 \cdot 0,00897 \cdot 0,583 = 3,96 MPa,$$

čia F – fibrų faktorius, kuris apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$F = \frac{l_f}{d_f} V_f \beta = \frac{60}{0,75} \cdot 0,0075 \cdot 0,75 = 0,45;$$

čia $l_f = 60 mm$ – fibros ilgis;

$d_f = 0,75 mm$ – fibros skersmuo;

$V_f = 0,0075$ – fibrų kiekis;

$\beta = 0,75$ – sukibimo koeficientas lenktoms fibroms.

$f_c \approx 0,8 \cdot f_{cube,vid} = 0,8 \cdot 30,85 = 24,7 MPa$ – C serijos betono vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris (4.2 lentelė);

$\rho = 0,897\%$ – išilginės armatūros kiekis;

$d / a = 0,175 / 0,3 = 0,583$ – naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis.

SFRC_1,5 serijos sijų teorinis įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = (0,7\sqrt{f_c} + 7F)\frac{d}{a} + 17,2\rho\frac{d}{a} = (0,7\sqrt{24,7} + 7 \cdot 0,9) \cdot 0,583 + 17,2 \cdot 0,00897 \cdot 0,583 = 5,79 MPa,$$

čia F – fibrų faktorius, kuris apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$F = \frac{l_f}{d_f} V_f \beta = \frac{60}{0,75} \cdot 0,015 \cdot 0,75 = 0,9;$$

čia $l_f = 60 mm$ – fibros ilgis;

$d_f = 0,75 mm$ – fibros skersmuo;

$V_f = 0,015$ – fibrų kiekis;

$\beta = 0,75$ – sukibimo koeficientas lenktoms fibroms.

$f_c \approx 0,8 \cdot f_{cube,vid} = 0,8 \cdot 30,85 = 24,7 MPa$ – C serijos betono vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris (4.2 lentelė);

$\rho = 0,897\%$ – išilginės armatūros kiekis;

$d / a = 0,175 / 0,3 = 0,583$ – naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis.

3.4.4. Sijų įstrižojo pjūvio stiprumas pagal V. C. Li, R. Wardo, A. M. Hamza modelį

C serijos sijų teorinis įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = 9,16 \left[\left(f_{cf} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\rho \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{d}{a} \right) \right] = 9,16 \left[5,71^{\frac{2}{3}} \cdot 0,00897^{\frac{1}{3}} \cdot 0,583 \right] = 3,54 MPa,$$

čia $f_{cf} = 5,71 MPa$ – vidutinis lenkiamasis C serijos betono stipris (4.3 lentelė);

$\rho = 0,897\%$ – išilginės armatūros kiekis;

$d / a = 0,175 / 0,3 = 0,583$ – naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis.

SFRC_0,75 serijos sijų teorinis įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = 9,16 \left[(f_{cf})^{\frac{2}{3}} \cdot (\rho)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{d}{a} \right) \right] = 9,16 \left[9,08^{\frac{2}{3}} \cdot 0,00897^{\frac{1}{3}} \cdot 0,583 \right] = 4,83 MPa,$$

čia $f_{cf} = 9,08 MPa$ – vidutinis lenkiamasis SFRC_0,75 serijos betono stipris (4.3 lentelė);

$\rho = 0,897\%$ – išilginės armatūros kiekis;

$d / a = 0,175 / 0,3 = 0,583$ – naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis.

SFRC_1,5 serijos sijų teorinis įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = 9,16 \left[(f_{cf})^{\frac{2}{3}} \cdot (\rho)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{d}{a} \right) \right] = 9,16 \left[9,80^{\frac{2}{3}} \cdot 0,00897^{\frac{1}{3}} \cdot 0,583 \right] = 5,09 MPa,$$

čia $f_{cf} = 9,80 MPa$ – lenkiamasis SFRC_1,5 serijos betono stipris (4.3 lentelė);

$\rho = 0,897\%$ – išilginės armatūros kiekis;

$d / a = 0,175 / 0,3 = 0,583$ – naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis.

3.4.5. Sijų įstrižojo pjūvio stiprumas pagal M. Khuntia, B. Stojadinoviciaus, S. C. Goelio modelį

C serijos sijų teorinis įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = (0,167\alpha + 0,25F_1)\sqrt{f_c} = (0,167 \cdot 1,46 + 0,25 \cdot 0)\sqrt{24,7} = 1,211 MPa,$$

čia $F = 0$ – fibrų faktorius, kai $V_f = 0$;

$f_c \approx 0,8 \cdot f_{cube,vid} = 0,8 \cdot 30,85 = 24,7 MPa$ – C serijos betono vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris (4.2 lentelė);

$\alpha = 2,5 \cdot \frac{d}{a} = 2,5 \cdot \frac{0,175}{0,3} = 1,46 < 3$ – arkos efekto koeficientas.

SFRC_0,75 serijos sijų teorinė įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = (0,167\alpha + 0,25F_1)\sqrt{f_c} = (0,167 \cdot 1,46 + 0,25 \cdot 0,6)\sqrt{24,7} = 1,96 MPa,$$

čia F_1 – fibrų faktorius, išreiškiamas taip:

$$F_1 = \beta V_f \frac{l_f}{d_f} = 1,0 \cdot 0,0075 \cdot \frac{60}{0,75} = 0,6,$$

čia $V_f = 0,0075$ – fibrų kiekis;

$l_f = 60\text{mm}$ – fibros ilgis;

$d_f = 0,75\text{mm}$ – fibros skersmuo;

$\beta = 1,0$ – sukibimo koeficientas lenktoms fibroms;

$$\alpha = 2,5 \cdot \frac{d}{a} = 2,5 \cdot \frac{0,175}{0,3} = 1,46 < 3 \text{ – arkos efekto koeficientas;}$$

$f_c \approx 0,8 \cdot f_{cube,vid} = 0,8 \cdot 30,85 = 24,7\text{MPa}$ – C serijos betono vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris (4.2 lentelė).

SFRC_1,5 serijos sijų teorinis įstrižojo pjūvio stiprumas

$$v_{frc} = (0,167\alpha + 0,25F_1)\sqrt{f_c} = (0,167 \cdot 1,46 + 0,25 \cdot 1,2)\sqrt{24,7} = 2,70\text{MPa},$$

čia F_1 – fibrų faktorius, išreiškiamas taip:

$$F_1 = \beta V_f \frac{l_f}{d_f} = 1,0 \cdot 0,015 \cdot \frac{60}{0,75} = 1,2,$$

čia $V_f = 0,015$ – fibrų kiekis;

$l_f = 60\text{mm}$ – fibros ilgis;

$d_f = 0,75\text{mm}$ – fibros skersmuo;

$\beta = 1,0$ – sukibimo koeficientas lenktoms fibroms;

$$\alpha = 2,5 \cdot \frac{d}{a} = 2,5 \cdot \frac{0,175}{0,3} = 1,46 \text{ – arkos efekto koeficientas;}$$

$f_c \approx 0,8 \cdot f_{cube,vid} = 0,8 \cdot 30,85 = 24,7\text{MPa}$ – C serijos betono vidutinis cilindrinis gniuždomasis stipris (4.2 lentelė).

3.4.6. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų analizė

Plieninėmis fibromis armuotų sijų įstrižojo pjūvio stiprumo teorinės reikšmės gautos naudojantis 1.2 skyriuje aprašytais modeliais bei eksperimentiškai gautais betono stiprumo rodikliais. Sijų įstrižojo pjūvio stiprumo eksperimentinių ir teorinių reikšmių palyginimas pateiktas 4.5 lentelėje, o fibrų kiekio įtaka sijų įstrižojo pjūvio stiprumo padidėjimui įvairiose eksperimentinėse programose parodyta 4.26 pav.

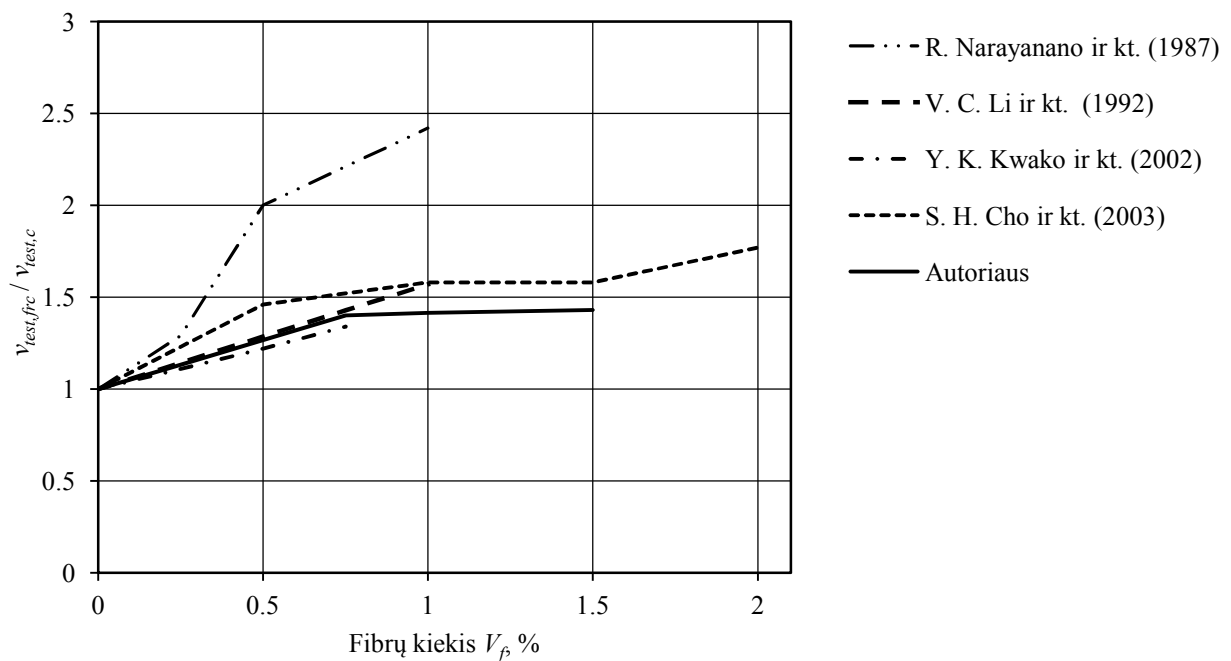
4.5 lentelė. Lenkiamų sijų eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas

Serijos Pav.	$v_{test,vid}$, MPa	Įstrižojo pjūvio stiprumas $v_{cal}(v_{test,vid}/v_{cal})$, MPa(kartai)					
		A.K. Sharma (1986)	R. Narayanas ir I. Y. S. Darwishas (1987)	S. A. Ashouras <i>ir kt.</i> (1992)	V.C.Li <i>ir kt.</i> (1992)	M. Khuntia <i>ir kt.</i> (1999)	EC-2
C	2,35	2,29(1,03)	1,634(1,44)	2,12(1,11)	3,54(0,66)	1,211(1,94)	1,011(2,32)
SFRC_0,75	3,29*	2,29(1,44)	2,75(1,20)	3,96(0,83)	4,83(0,68)	1,96(1,68)	-
SFRC_1,5	3,37*	2,29(1,47)	3,65(0,92)	5,79(0,58)	5,09(0,66)	2,70(1,25)	-

Pastabos:

- (1) $v_{test,vid}$ – vidutinis eksperimentinis serijos sijų įstrižojo pjūvio stiprumas; v_{cal} – teorinė serijos sijų įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmė, apskaičiuota 4.4.1-4.4.5 skyriuose; $v_{test,vid}/v_{cal}$ – eksperimentinio ir teorinio įstrižojo pjūvio stiprumo santykis;
- (2) * suirimas normaliniame pjūvyje

Iš 4.5 lentelėje pateiktų atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatų matyti, kad 1,5 % fibrų padidina sijos įstrižojo pjūvio stiprumą vidutiniškai 1,43 karto. Šių rezultatų palyginimas su kitų autorių gautomis įstrižojo pjūvio stiprumo eksperimentinėmis reikšmėmis (4.26 pav.) rodo, kad autoriaus eksperimentinės dalies rezultatai artimiausi Y. K. Kwako *ir kt.* (Y. K. Kwak *et al.* 2002) ir V. C. Li *ir kt.* (V. C. Li *et al.* 1992) rezultatams. Ypač geras rezultatų atitikimas su V. C. Li *ir kt.* (V. C. Li *et al.* 1992) pateiktais duomenimis yra iki 0,75 % fibrų kiekio.

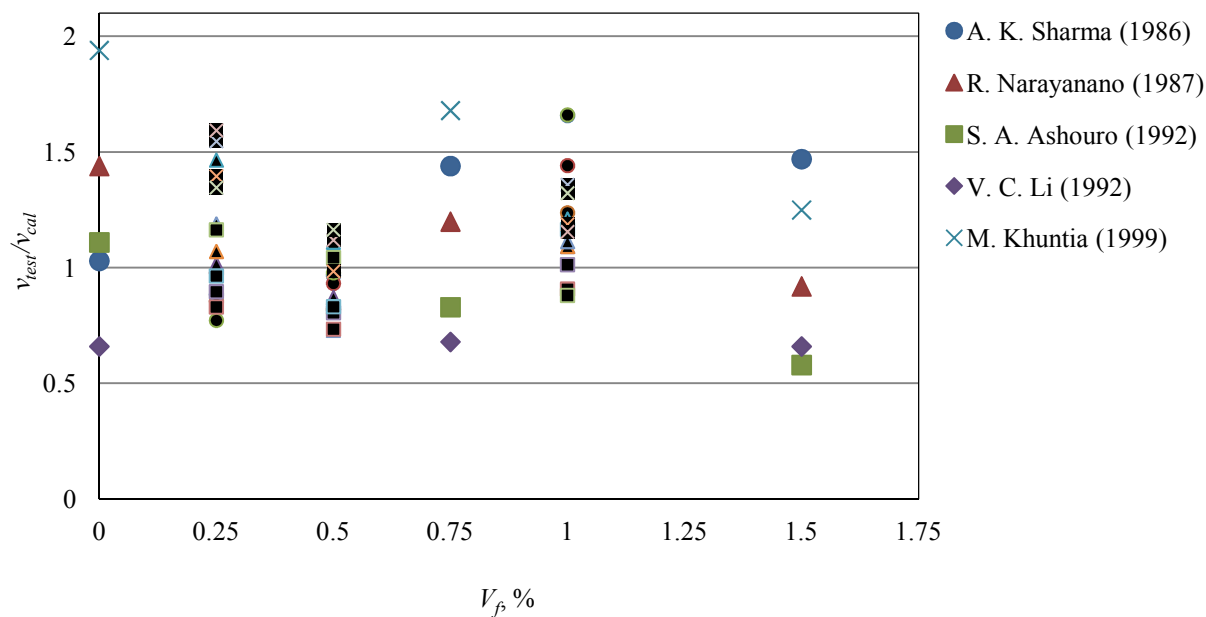


4.26 pav. Plieninių fibrų kiekio įtaka sijų įstrižojo pjūvio stiprumo padidėjimui įvairiose eksperimentinėse programose; $v_{test,frc}/v_{test,c}$ – fibrobetonio ir įprasto betono sijų įstrižojo pjūvio stiprumo eksperimentinių reikšmų santykis

Atlikta eksperimentinė programa parodė, kad geriausiai sijų eksperimentines įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmes atitinka R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho (1987) modeliu gauti rezultatai, pagal kurį apskaičiuotos įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmės nuo eksperimentinių skiriasi vidutiniškai 1,24 karto. Tai vienintelis modelis, kuriame buvo naudojamas fibrobetonio gniuždomasis stipris. Šiame modelyje pastebimas tolygus $v_{test,vid}/v_{cal}$ santykio mažėjimas didinant fibrų kiekį.

Remiantis 4.5 lentelės duomenimis galima teigti, kad A. K. Sharma (1986) ir M. Khuntia *ir kt.* (1999) modeliai per daug konservatyvūs, tuo tarpu V. C. Li *ir kt.* (1992) modelyje fibrų kiekio įtaka įstrižojo pjūvio stiprumui pervertinama.

4.27 pav. parodytas grafinis 17 bandinių teorinių ir eksperimentinių įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmių palyginimas apjungus autoriaus eksperimentinės programos rezultatus (vienspalvės figūros) ir R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho (1987) bandymo rezultatus. Kaip matyti iš 4.27 pav. pateiktų kreivių, eksperimentinėje programoje gautų ir apskaičiuotų 4.4.1.-4.4.5. skyriuose rezultatų santykio priklausomybė nuo fibrų kiekio R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho (1987), S. A. Ashouro *ir kt.* (1992) ir V. C. Li *ir kt.* (1992) modeliuose yra artima tiesinei.



4.27 pav. Lenkiamų sijų eksperimentinių ir teorinių įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmių palyginimas (17 bandinių; 5 bandiniai autoriaus (vienspalvės figūros), kiti 12 – R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho (1987))

3.5 Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikti skirtingais plieninių fibrų kiekiais armuoto betono gniuždymo ir lenkimo stiprio eksperimentiniai tyrimai. Nustatyta, kad esant fibrų armavimo procentui 0,75 % ir 1,5 %, gniuždymo stipris padidėja atitinkamai 1,22 ir 1,25 karto, o lenkimo stipris – 1,58 ir 1,72 karto. Taip pat pastebėtas lenkiamų bandinių trapių suirimo pobūdžio pasikeitimas į plastišką.
2. Atlikti 6 sijų, armuotų skirtingais plieninių fibrų kiekiais, eksperimentiniai tyrimai. Nustatyta, kad esant fibrų armavimo procentui 0,75 % ir 1,5 %, sijų įstrižojo pjūvio stiprumas padidėjo vidutiniškai 1,39 ir 1,43 karto, o lenkiamasis standumas – 1,13 ir 1,26 karto.
3. Atlikus sijų eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad esant fibrų armavimo procentui 0,75 % ir 1,5 %, įlinkis padidėjo nuo 2,6 iki 6,0 karto, o plyšio atsivėrimo jėga – nuo 1,1 iki 1,4 karto.
4. Eksperimentinės programos sijų suirimo pobūdžiui pakeisti iš trapių suirimo įstrižajame pjūvyje į plastišką, prognozuojamą suirimą normaliniame pjūvyje užteko vos 0,75 %

plieninių fibrų. Tai rodo, kad kad plieninės fibros kai kuriais atvejais net gali atstoti skersinę armatūrą.

5. Kaip parodė teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas, egzistuoja dideli skaičiavimo skirtumai. Teorinės ir eksperimentinės reikšmės skiriasi net iki 1,94 karto (M. Khuntia *ir kt.* modelyje). Tiksliausiai lenkiamų sijų eksperimentinės įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmės atitinka taikant R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho (R. Narayanan ir I. Y. S. Darwish 1987) modelį gauti rezultatai. Pagal šį modelį apskaičiuotos įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmės nuo eksperimentinių skiriasi vidutiniškai 1,24 karto.

GALUTINĖS IŠVADOS

1. Sijų, armuotų plieninėmis fibromis, įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelių apžvalga parodė, kad nėra bendros skaičiavimo metodikos. Įvairiuose modeliuose įstrižojo pjūvio stiprumas siejamas su tam tikra betono stiprio charakteristika: tempiamuoju stipriu skeliant (Sharma 1986, Narayanan ir Darwish 1987), gniuždomuoju stipriu (Ashour *et al.* 1992, Khuntia *et al.* 1999), tempiamuoju stipriu skeliant ar lenkiamuoju stipriu (Li *et al.* 1992). Kaip rodo pačių autorių pateikti rezultatai, visų modelių tikslumas yra skirtingas ir varijuoja taip: sisteminė paklaida – nuo 1,03 iki 1,12; atsitiktinė – nuo 7,6 iki 21 %.
2. Kaip rodo atlikta analizė, visi nagrinėti modeliai yra empiriniai ar pusiau empiriniai, sukurti analizuojant atliktų eksperimentinių badymų rezultatus ir remiantis ankstesnių autorių darbais. Tai rodo, kad modeliai tiesiogiai neatspindi realaus suirimo charakterio. Taip pat nustatyta, kad visuose modeliuose vyrauja tie patys parametrai, t.y. naudingojo aukščio ir jėgos peties santykis d/a (arba a/d) ir betono stipris.
3. Atlikta penkių įstrižojo pjūvio stiprumo skaičiavimo modelių parametrinė analizė, kurioje buvo tiriama pagrindinių parametų, tokių kaip jėgos peties ir naudingojo aukščio santykio, fibrų, išilginės armatūros kiekio ir betono stiprio įtaka skaičiavimo rezultatams. Nustatyta, kad didžiausią įtaką sijų, armuotų plieninėmis fibromis, įstrižojo pjūvio stiprumui turi jėgos peties ir naudingojo aukščio santykis a/d . Santykio a/d padidinimas 4 kartais įstrižojo pjūvio stiprumą įvairiuose modeliuose sumažina nuo 1,41 iki 4,0 karto.
4. Kiti parametrai, tokie kaip fibrų kiekis, išilginės armatūros kiekis ir betono stipris yra mažiau reikšmingi nei santykis a/d : vidutiniškai padidinus šiuos parametrus iki 4 kartų, įstrižojo pjūvio stiprumas padidėja nuo 1,1 iki 2,0 karto. Deja, visuose modeliuose šie parametrai taip pat vertinami skirtingai.
5. Atlikus parametrinę analizę taip pat nustatyta, kad visuose modeliuose fibrų kiekio įtaka vertinama tiesine priklausomybe, tačiau taip pat skirtingai. Didžiausia fibrų kiekio įtaka išryškėjo S. A. Ashouro *ir kt.* bei M. Khuntia *ir kt.* modeliuose, o mažiausia – R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho modelyje.
6. Atlikti 6 sijų, armuotų skirtingais plieninių fibrų kiekiais, eksperimentiniai tyrimai. Nustatyta, kad plieninės fibros turi didelę įtaką: esant fibrų armavimo procentui 0,75 %

ir 1,5 %, sijų įstrižojo pjūvio stiprumas padidėjo vidutiniškai 1,39 ir 1,43 karto, lenkiamasis standumas – 1,13 ir 1,26 karto, sijos įlinkis – nuo 2,6 iki 6,0 karto, plyšio atsivėrimo jėga – nuo 1,1 iki 1,4 karto.

7. Eksperimentinės programos sijų suirimo pobūdžiui pakeisti iš trapių suirimo įstrižajame pjūvyje į plastišką, prognozuojamą suirimą normaliniame pjūvyje užteko vos 0,75 % plieninių fibrų. Tai rodo, kad kad plieninės fibros kai kuriais atvejais net gali atstoti skersinę armatūrą.
8. Kaip parodė teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas, egzistuoja dideli skaičiavimo skirtumai. Teorinės ir eksperimentinės reikšmės skiriasi net iki 1,94 karto (M. Khuntia *ir kt.* modelyje). Tiksliausiai lenkiamų sijų eksperimentinės įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmės atitinka taikant R. Narayanano ir I. Y. S. Darwisho (R. Narayanan ir I. Y. S. Darwish 1987) modelį gauti rezultatai. Pagal šį modelį apskaičiuotos įstrižojo pjūvio stiprumo reikšmės nuo eksperimentinių skiriasi vidutiniškai 1,24 karto.

Literatūros sąrašas

Ashour, S. A.; Hasanain, G. S.; Wafa, F. F. 1992. Shear Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, 89(2), 176-184.

ASTM C1018-97, "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete Using Beam With Third-Point Loading," ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997, 7 pp.

Bentur, A.; Mindess, S. 1990. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. London: Taylor & Francis. 624 p.

Caijun, S.; Yilung M. 2008. *High-Performance Construction Materials: Science and Applications*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 448 p.

Casanova, P.; Rossi, P. 1999. High-Strength Concrete Beams Submitted to Shear: Steel Fibers versus Stirrups, *Structural Applications of Fiber Reinforced Concrete*, SP-182, N. Banthia, C. MacDonald, and P. Tatnall, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 53-67.

Cho, S.-H.; Kim, Y.-I. 2003. Effects of Steel Fibers on Short Beams Loaded in Shear, *ACI Structural Journal*, 100(6), 765-774.

Choi, K.-K.; Park, H.-G.; Wight, J. K. 2007. Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, *ACI Structural Journal*, V. 104, No. 1, Jan.-Feb. pp. 12-21.

Collins, M. P.; Bentz, E. C.; Sherwood, E. G. 2008. Where is Shear Reinforcement Required ? Review of Research Results and Design Procedures, *ACI Structural Journal*, V. 105, No. 5, September-October, pp. 590-600.

Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės. LST EN 1992-1-1:2005. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2007.

Hai H. Dinh; Gustavo J. Parra-Montesinos; James K. Wight. 2010. Shear Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement, *ACI Structural Journal*, V. 107, No. 05, September-October, pp. 597-606.

Haisam E. Yakoub. 2011. Shear Stress Prediction: Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without stirrups, *ACI Structural Journal*, V. 108, No. 03, May-June, pp. 304-314.

Jansson, A. 2008. *Fibres in reinforced concrete structures - analysis, experiments and design*. Chalmers University of Technology. 48 p.

JSCE-SF4. 1984. *Methods of tests for flexural strength and flexural toughness of fibre reinforced concrete*. Japanese society of civil engineers.

Katzer, J. 2006. Steel Fibers and Steel Fiber Reinforced Concrete in Civil Engineering, *The Pacific Journal of Science and Technology*, V. 7, No. 01, May, pp. 53-58.

Khuntia, M.; Stojadinovic, B.; Goel, S. C. 1999. "Shear Strength of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups." *ACI Structural Journal*, 96(2), 282-289.

Kwak, Y.-K.; Eberhard, M. O.; Kim, W.-S.; and Kim, J. 2002. Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups, *ACI Structural Journal*, V. 99, No. 4, July-Aug., pp. 530-538.

Li, V. C.; Ward, R.; Hamza, A. M. 1992. "Steel and Synthetic Fibers as Shear Reinforcement." *ACI Materials Journal*, 89(5), 499-508.

Li, V. C. 2002. Large Volume, High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering, *Journal of Applied Polymer Science* 83(2): 660–686.

LST EN 12390-5:2009. Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2011.

Marčiukaitis, G. 1998. *Statybinių kompozitų kūrimo ir prognozavimo principai*. Vilnius: Technika. 134 p.

Naaman, A.E. 2003. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Japan Concrete Institute, Vol. 1, No. 3, November, pp. 241-252.

Narayanan, R.; Kareem-Palanjian, A. S. 1984. Effect of Fiber Addition on Concrete Strengths, *Indian Concrete Journal* (Bombay), V. 58, No. 04, Apr., pp. 100-103.

Narayanan, R.; Darwish, I. Y. S. 1987. Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 84(3), 216-227.

Park, R.; Paulay, T. 1975. *Reinforced concrete structures*. Christchurch: John Wiley and Sons. 769 p.

Romualdi, J. P.; Mandel, J. A. 1964. Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement, *ACI JOURNAL, Proceedings* V. 61, No. 06, June, pp. 657-671.

Sharma, A. K. 1986. Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, *ACI JOURNAL, Proceedings* V. 83, No. 4, July-Aug., pp. 624-628.

Swamy, R. N.; Mangat, P. S.; Rao, C. V. S. K. 1974. The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrices, *Fiber Reinforced Concrete*, SP-44, American Concrete Institute, Detroit, pp. 1-28.

Šalna, R. 2008. *Dispersinio armavimo įtaka gelžbetoninių besijų perdangos plokščių praspaudimui*. Vilnius: Technika. 156 p.

Zsutty, T. 1968. Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data," *ACI JOURNAL, Proceedings* V. 65, No. 11, Nov., pp. 943-951.

A priedas. Lenkiamų plieninėmis fibromis armuotų sijų eksperimentiniai rezultatai

Eil. Nr.	Tyrėjas	Fibrų rūšis	$V_f, \%$	l/d_f	$\rho, \%$	d, mm	a/d	f_c, MPa	v_0, MPa
1	R. Narayananas ir I. Y. S. Darwishas (1987)	C	-	-	2,0	130	2,0	60,2	2,30
2			-	-	2,0	130	2,5	60,2	1,63
3			-	-	2,0	130	3,0	60,2	1,58
4			-	-	2,0	130	2,0	43,3	1,86
5			-	-	2,0	130	2,5	36,7	1,47
6			-	-	2,0	130	3,0	43,3	1,71
7			0,25	100	2,0	130	2,0	61	2,96
8			0,25	100	2,0	130	3,0	61	2,77
9			0,25	100	2,0	130	2,0	39,2	2,71
10			0,25	100	2,0	130	3,0	39,2	1,94
11			0,5	133	2,0	130	3,0	36	1,97
12			0,5	133	2,0	130	3,5	49	2,61
13			0,5	133	3,69	130	3,0	36	2,24
14			0,5	133	5,72	130	3,1	36	2,33
15			0,5	133	2,0	130	2,0	60,8	4,62*
16			1,0	100	2,0	130	3,0	36	2,97
17			1,0	133	2,0	130	2,0	57,3	5,57
18			1,0	133	3,69	130	3,0	57,4	4,37
19			1,0	133	5,72	130	3,1	57,4	5,0
20	S. A. Ashouras ir kt. (1992)	H	0,5	75	2,84	215	1,0	99	9,09
21			0,5	75	2,84	215	2,0	99	4,82
22			1,0	75	2,84	215	1,0	95	12,74
23			1,0	75	2,84	215	2,0	95	6,06
24			1,5	75	2,84	215	1,0	96	13,95
25			1,5	75	2,84	215	2,0	96	7,21
26			1,0	75	4,58	215	2,0	94	6,73
27			1,0	75	4,58	215	4,0	94	3,88
28	V. C. Li ir kt. (1992)	C ir H	-	-	2,2	204	3,0	17,8	1,63
29			-	-	1,1	102	3,0	17,8	1,55
30			1,0	60	2,2	102	3,0	22,7	3,16
31			1,0	60	1,1	102	3,0	22,7	2,43
32			1,0	60	1,1	102	1,5	22,7	5,64
33			1,0	100	2,2	102	3,0	26	3,55
34			1,0	60	2,2	204	3,0	22,7	3,05
35			1,0	100	2,2	204	3,0	26	3,05
36	Y. K. Kwakas ir kt. (2002)	H	0	-	1,5	212	2,0	62,6	3,02
37			0,5	62,5	1,5	212	2,0	63,8	5,09
38			0,75	62,5	1,5	212	2,0	68,6	5,44
39			0	-	1,5	212	3,0	62,6	2,53
40			0,5	62,5	1,5	212	3,0	63,8	3,09
41			0,75	62,5	1,5	212	3,0	68,6	3,40
42			0	-	1,5	212	4,0	62,6	1,98
43			0,5	62,5	1,5	212	4,0	63,8	2,41
44			0,75	62,5	1,5	212	4,0	68,6	2,74
45	S. H. Cho ir kt. (2003)	H	-	-	1,3	167,5	1,43	54,3	3,24(65,1)
46			0,5	60	1,3	167,5	1,43	57,8	4,74(95,2)
47			1,0	60	1,3	167,5	1,43	61,5	5,12(103,0)
48			1,5	60	1,3	167,5	1,43	60,6	5,11(102,8)
49			2,0	60	1,3	167,5	1,43	62,3	5,72(114,9)

50	H. H. Dinhas <i>ir kt.</i> (2010)	H	-	-	2,7	381	3,43	42,8	1,1
51			0,75	55	2,0	381	3,43	44,8	2,9
52			1,0	55	2,0	381	3,50	38,1	3,1
53			1,5	55	2,7	381	3,43	44,9	3,3
54	Auktorius eksperimentiniai tyrimai	H	-	-	0,897	175	1,71	30,85	2,35
55			-	-	0,897	175	1,71	30,85	-
56			0,75	80	0,897	175	1,71	34,47	3,19
57			0,75	80	0,897	175	1,71	37,47	3,37
58			1,5	80	0,897	175	1,71	37,47	3,26
59			1,5	80	0,897	175	1,71	37,47	3,47